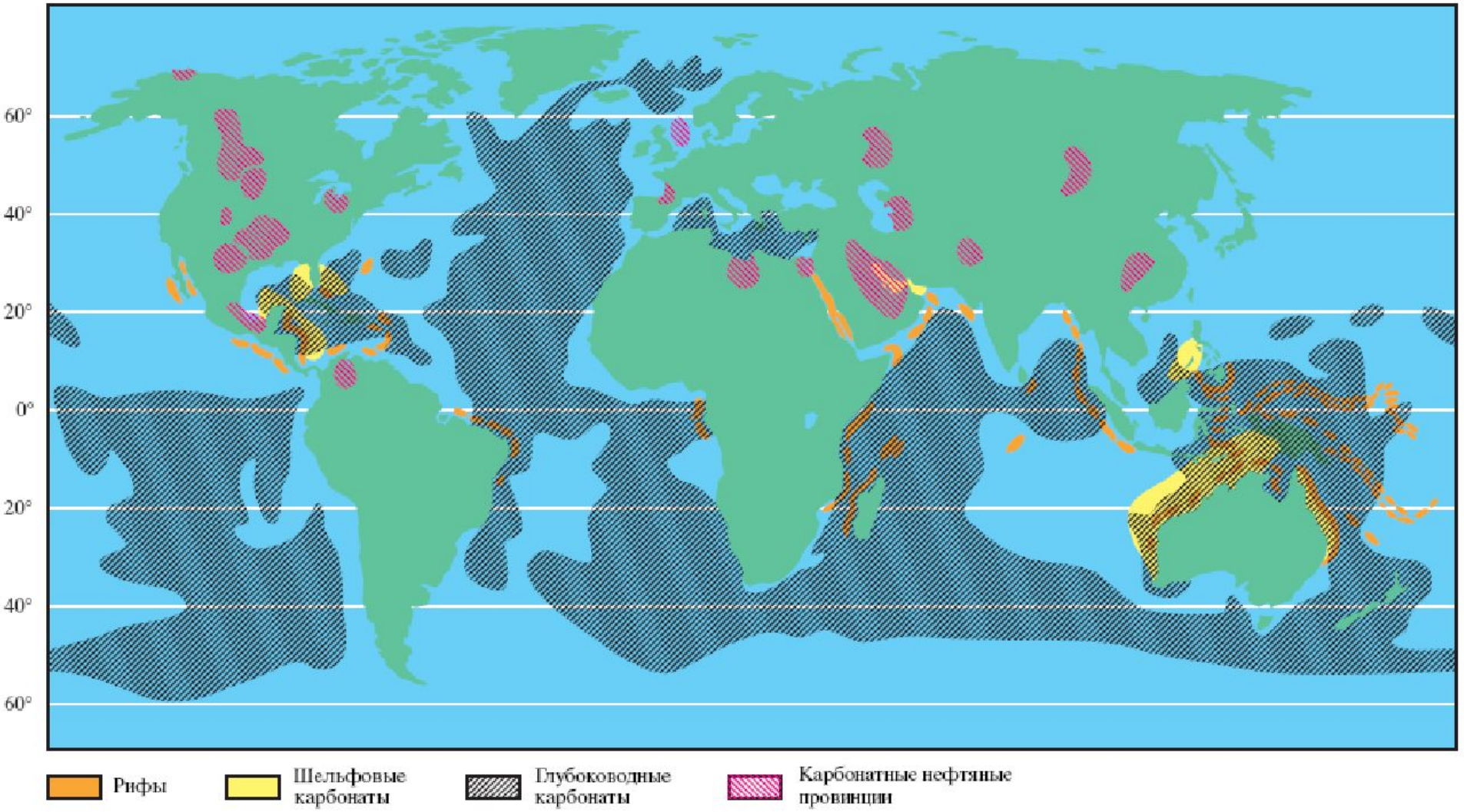
Природные резервуары карбонатных систем осадконакопления

Общие сведения

Карбонатные отложения и нефтяные провинции



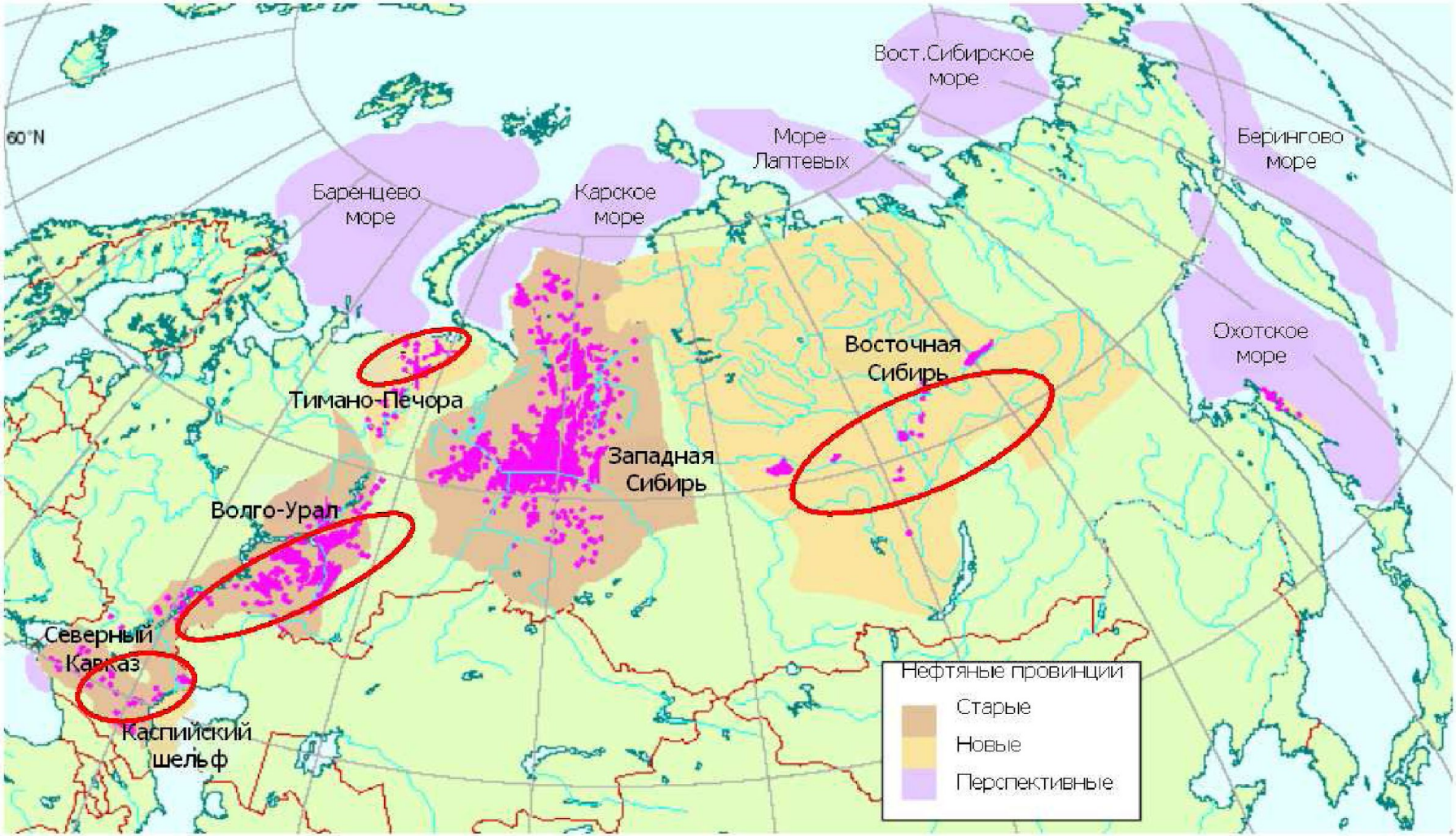
Карбонатные коллектора

Карбонатные коллектора имеют широкое распространение

60° N
40° N
20° N
0°
20° S
40° S
60° S

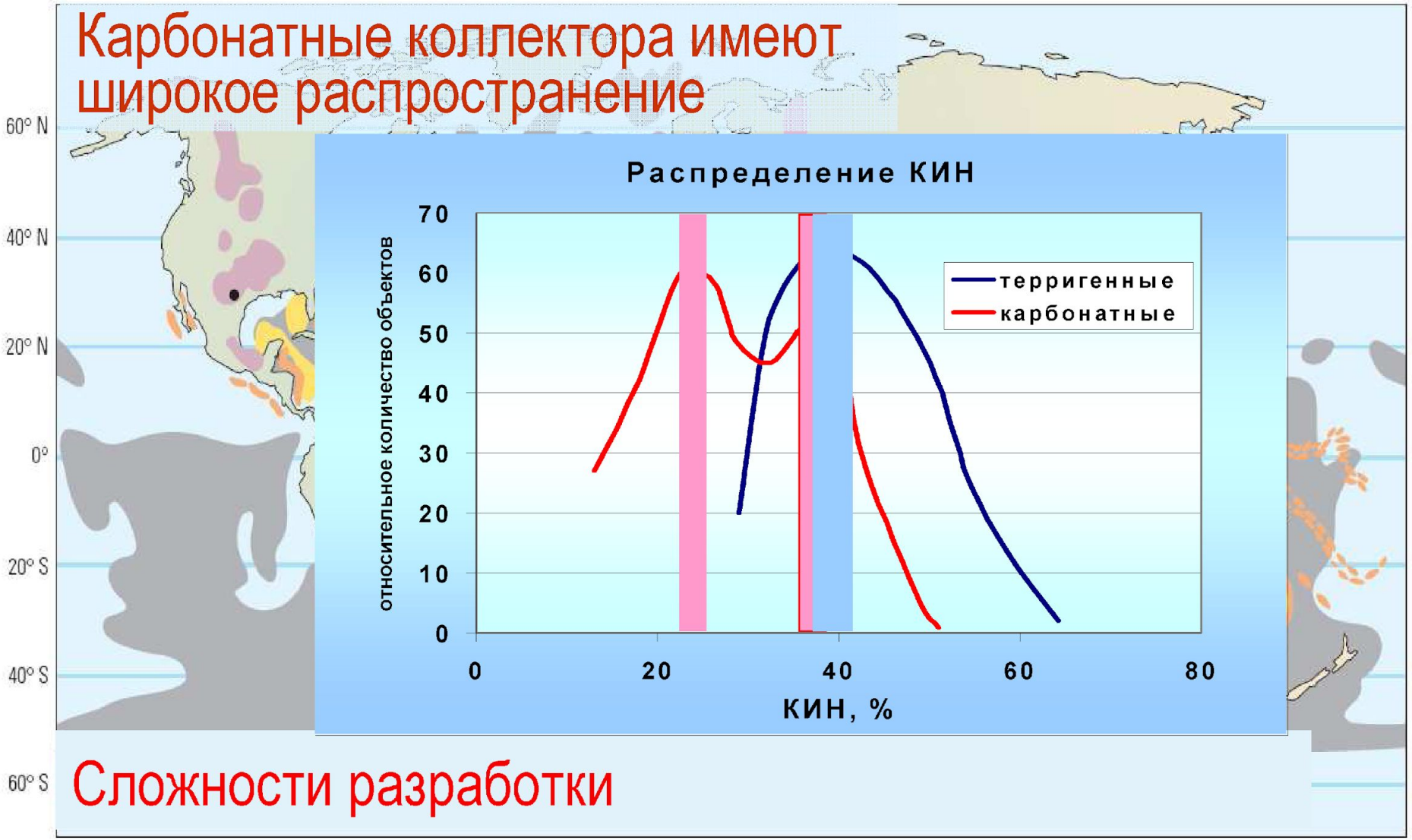
По разным оценкам доля мировых запасов нефти в карбонатах – от 35 до 65 %

Карбонаты в России



Карбонатные коллектора

Карбонатные коллектора имеют широкое распространение



Сложности разработки

Проблемы

- Вопросы, связанные с ***классификацией*** карбонатов, ***обстановками формирования*** осадков и их ***постседиментационными изменениями***, не могут считаться окончательно решенными.
- Сложность реконструкции условий формирования карбонатных пород ***обусловлена большим числом факторов их седиментогенеза и литогенеза.***
- Отсутствуют надежные данные, показывающие ***связь структуры пустотного пространства матрицы*** карбонатных пород-коллекторов и характера нефтенасыщенности с их ***структурно-генетическими типами*** и историей формирования.
- В отличие от терригенных коллекторов, пустотное пространство которых сформировалось преимущественно на стадиях седиментогенеза-литогенеза, «промышленно значимая» ***пустотность карбонатов***, не являющихся органогенными постройками, ***вторична***.

Чем обусловлены сложности разработки карбонатов?

- ***Сложность строения порового пространства***
- ***Разнообразие типов карбонатных коллекторов***
- ***Наличие микро- и макротрещиноватости***
- ***Деформационные процессы***
- ***Неоднородность коллекторов, вызванная условиями их формирования***

Где образуются известняки?

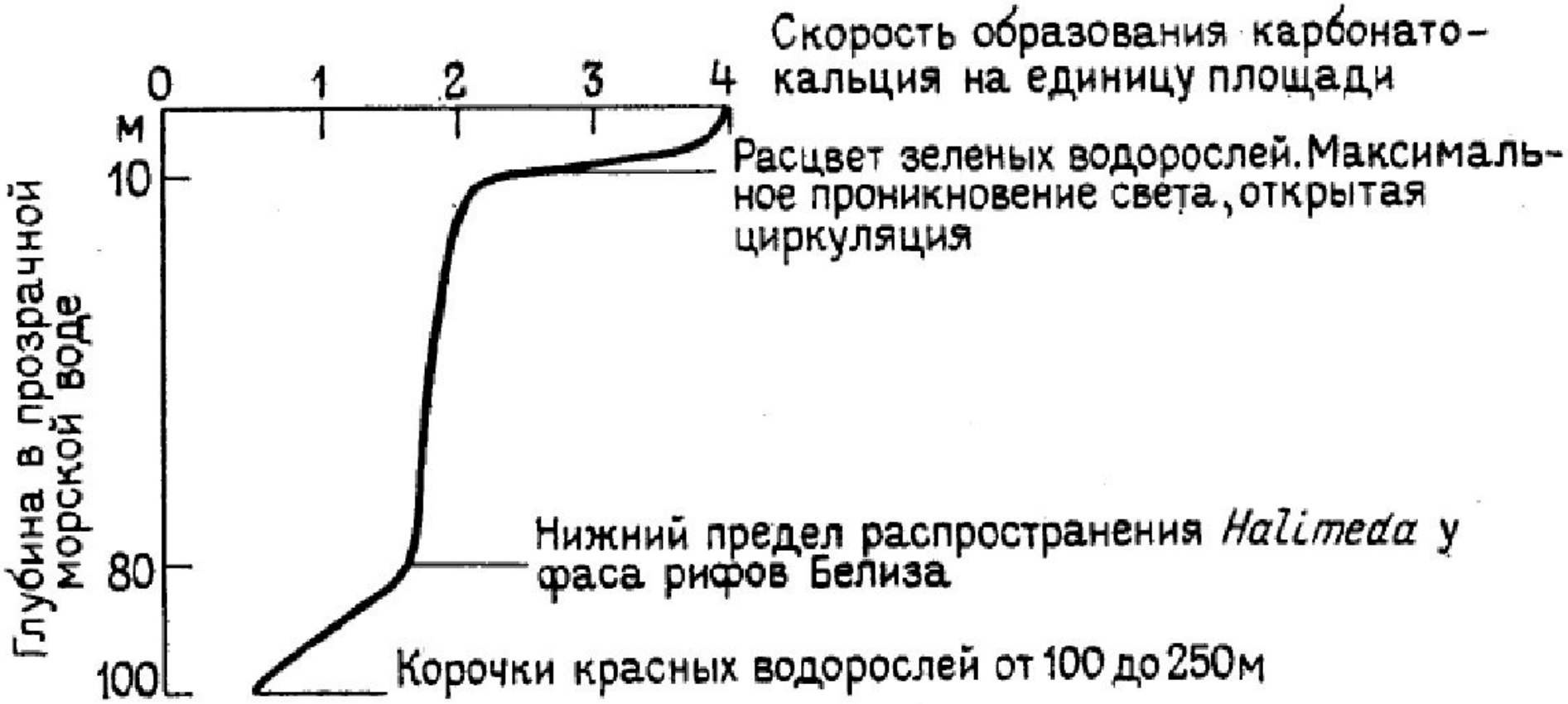
- **Мелководные бассейны – поздний протерозой – ныне**
- **Глубоководные бассейны – редкие в прошлом и более обычны ныне**
- **Пещерные натечные формы (сталактиты, сталагмиты) и гидротермалиты – древние и современные**
- **Озерные бассейны – древние и современные**

Современные области карбонатонакопления

Растворимость карбоната кальция

- $CaCO_3 + H2O + CO2 \longrightarrow Ca(HCO3)2$
- $CaCO_3$ меньше растворим в теплых водах, чем в холодных
- $CaCO_3$ осаждается в теплых мелких водах, но имеет повышенную растворимость на глубине в более холодных водах
- CO_2 в растворе буферирует концентрирование карбонат-иона (CO_3^{-2})
- Возрастание давления повышает концентрации HCO_3^{-1} и CO_3^{-2} (продукты реакции растворения) в морской воде
- $CaCO_3$ более растворим при более высоких давлениях и понижении температуры
- Благоприятна среда с pH = 8,4

Скорости образования карбонатов в зависимости от глубины



Доломитообразование

- **В морской воде соотношение ионов Mg/Ca равно 5,7, а доломитообразования не наблюдается.**
- **Отложение доломита в современных условиях происходит только в обстановках очень сильно повышенной солености мелководных озер или лагун при аридном климате.**
- **Неспособность доломита к выпадению в осадок из морской воды объясняется трудностями кристаллизации. Ионы Ca и Mg имеют близкие размеры и во время кристаллизации они конкурируют из-за места в решетке. В обычных условиях при формировании слоев кальция и магния образуется магнезиальный кальцит, иногда протодоломит (метастабильный ромбический карбонат).**
- **Магний находится в сильно гидратированном состоянии $Mg(H2O)2+$ и не может войти в кристаллическую позицию. Этот эффект снимается с возрастанием температуры.**
- **В экспериментах доломит получен при температуре 200C.**
- **Доломит формируется быстро на кальците в растворах с $MgCl2+NaCl+CaCl2$ и без сульфата**

Контроль карбонатной седиментации

1. **Температура** (климат) – тропики и субтропические регионы благоприятствуют карбонатонакоплению
2. **Освещенность** – фотосинтез управляет производством карбонатов
3. **Давление** – повышение давления с глубиной увеличивает растворимость карбонатов (зона карбонатной компенсации)
4. **Волновое перемешивание** – источник кислорода и удаление углекислого газа
5. **Деятельность организмов** – производство карбоната кальция за счет биогенной дифференциации
6. **Положение уровня моря** – карбонатонакопление меняется в зависимости от трактов стояния моря

Зональность карбонатонакопления

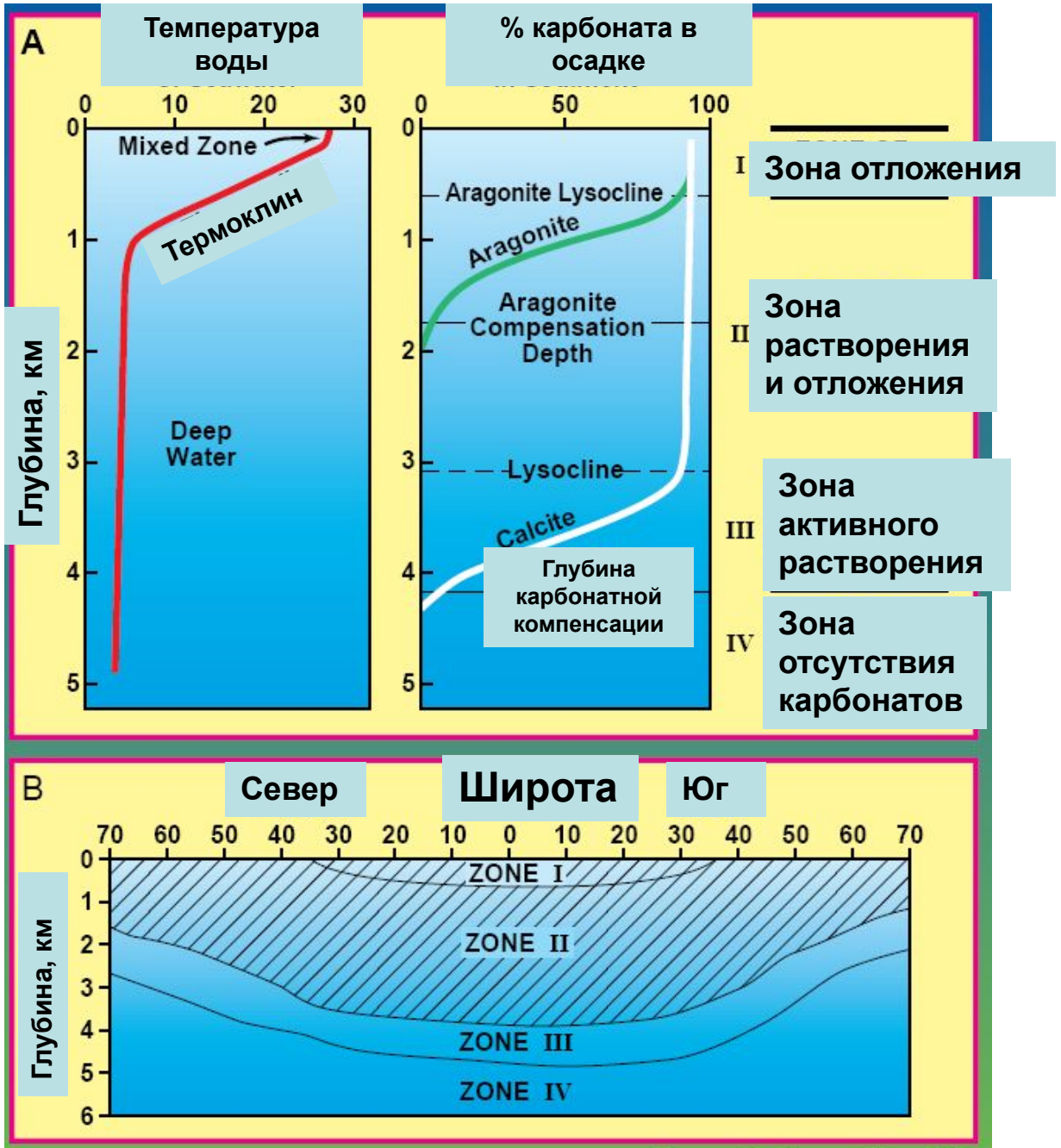
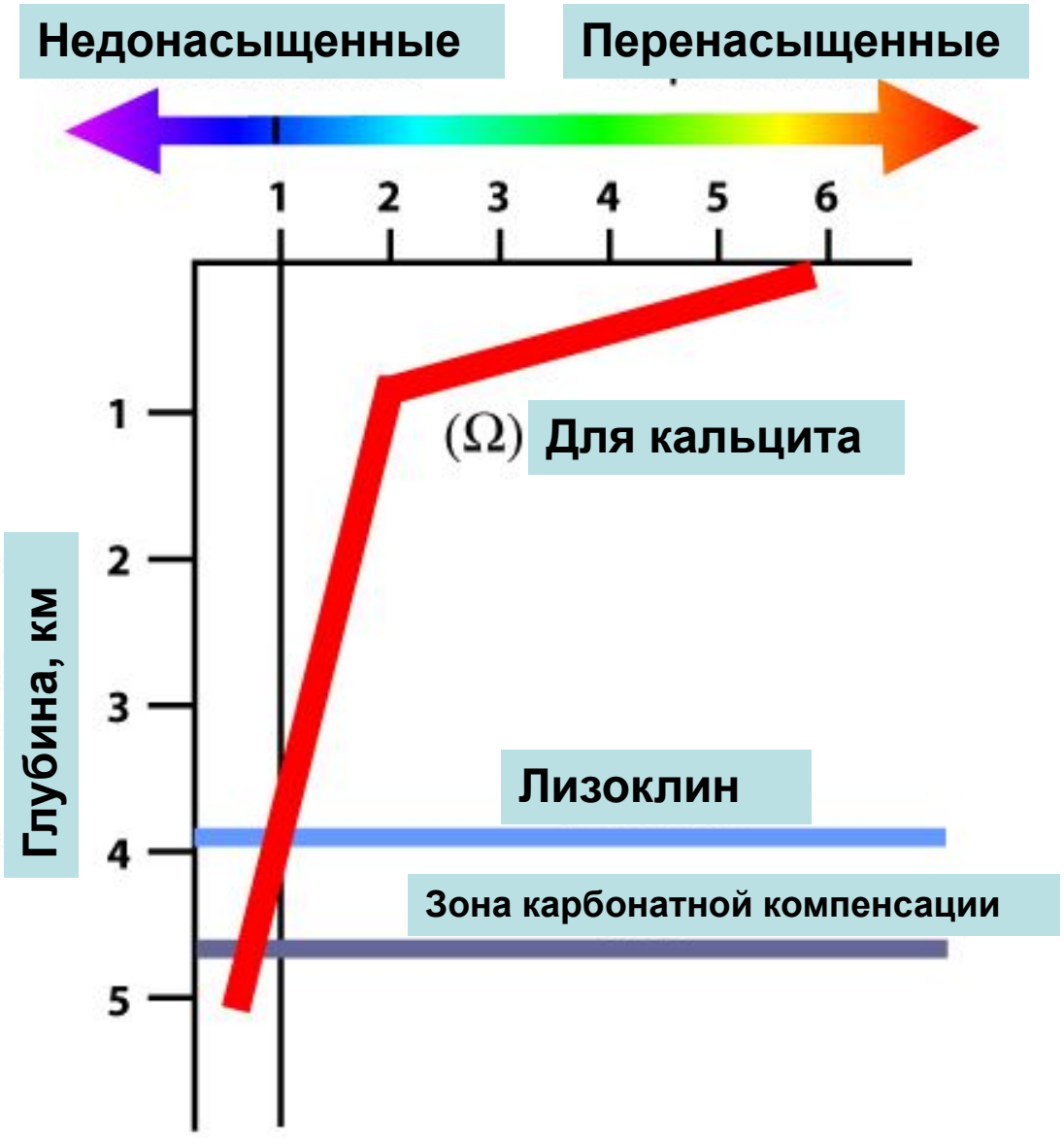
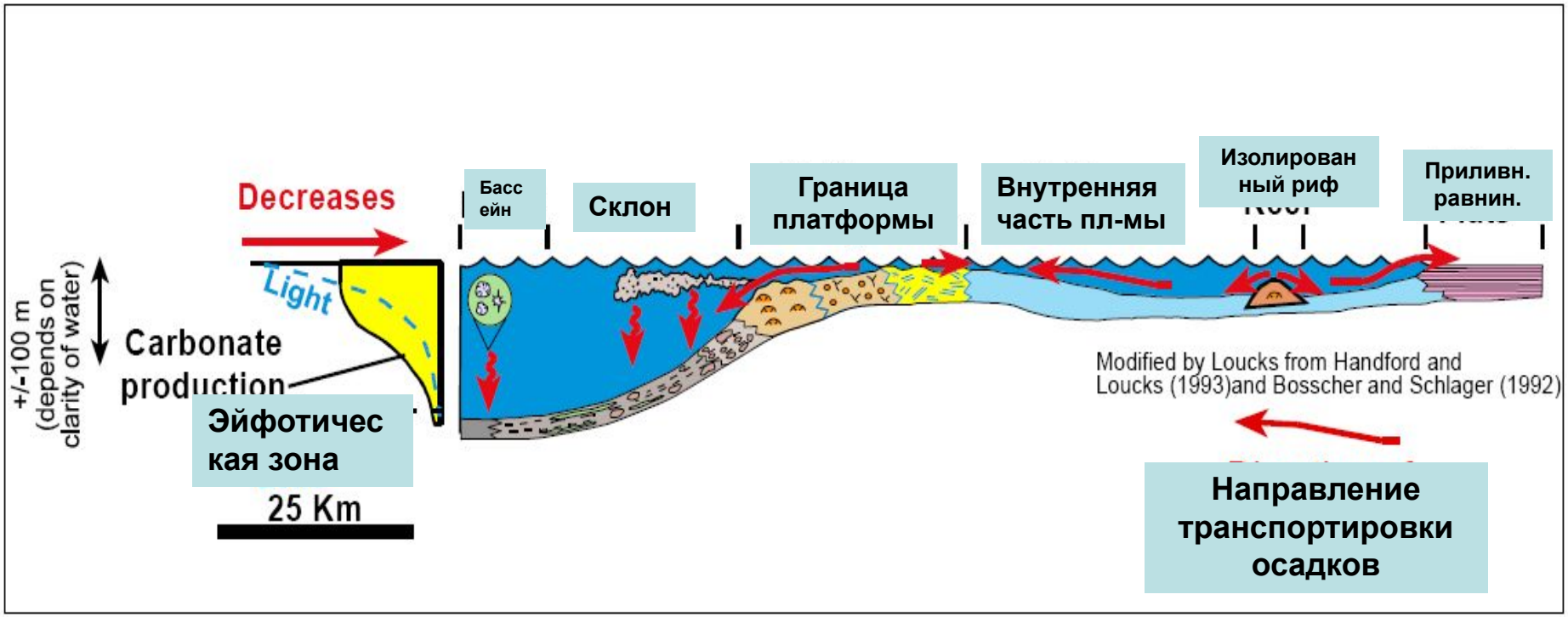


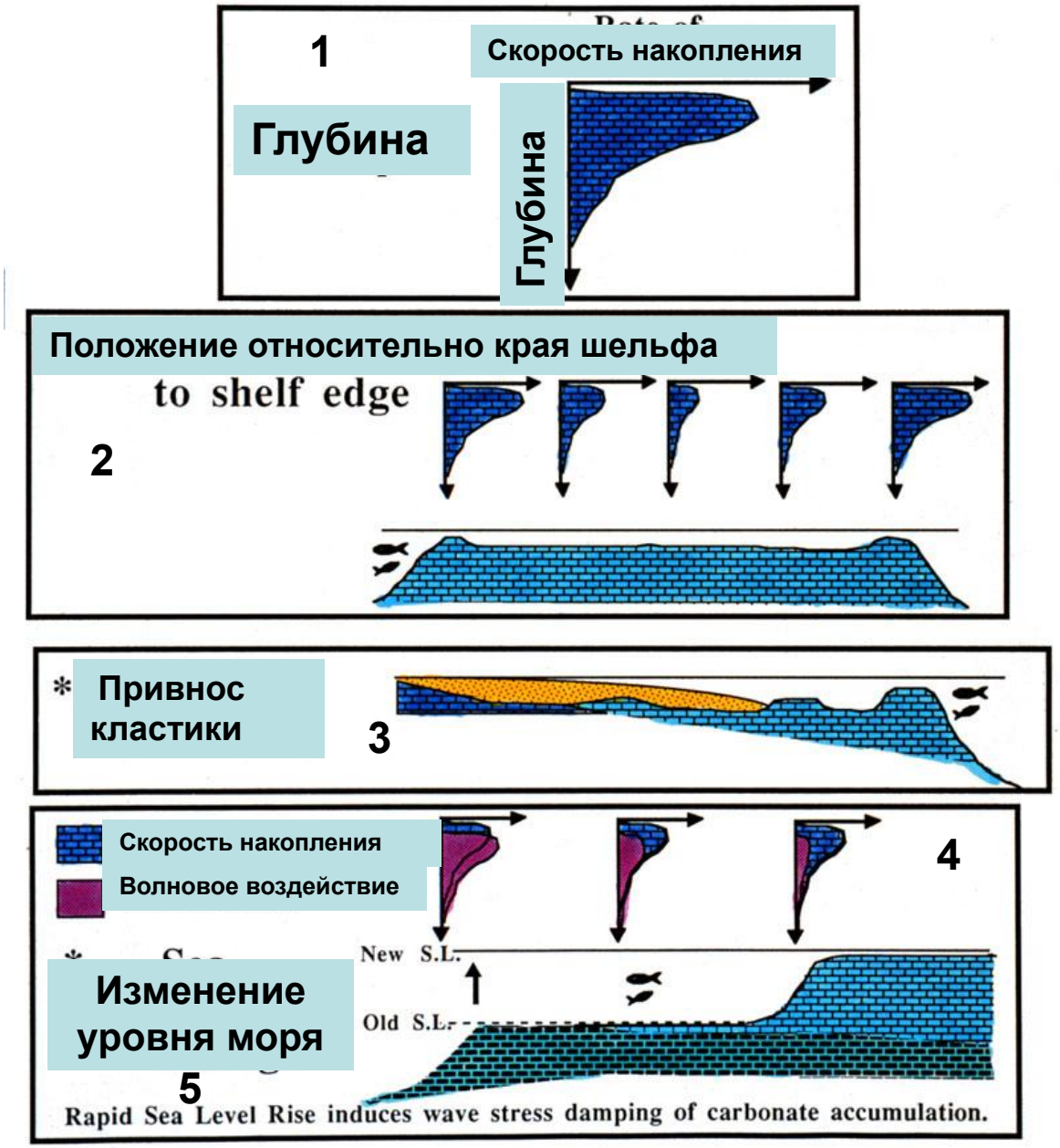
Диаграмма степень насыщения – глубина бассейна для кальцита



Типичные области карбонатонакопления



Факторы, контролирующие масштабы карбонатонакопления



Компонентный состав карбонатов

Минералогия карбонатов

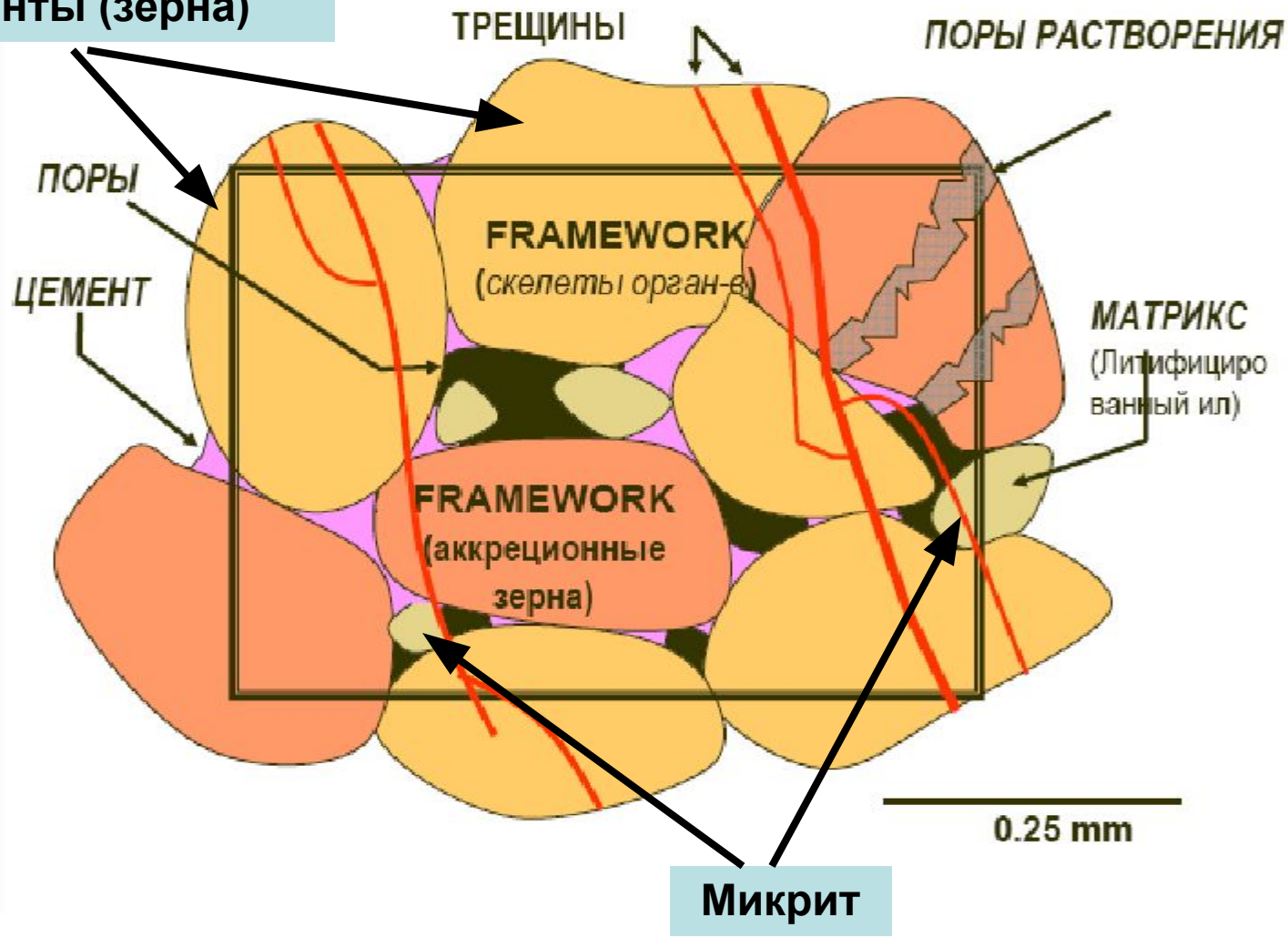
- **Арагонит (ромб.) – метастабильный минерал**
- **Кальцит (тригон.) – устойчив в морской воде: *1) низкомагнезиальный кальцит*, *2) высокомагнезиальный кальцит***
- **Доломит – устойчив в морской воде и на дневной поверхности**
- **Породы: известняк, доломит**

Составные части карбонатных пород

- **Представляют собой ассоциацию двух разнородных компонентов: 1)форменных элементов (зерен) и 2) связующей массы (микрита или карбонатного ила)**
- **Форменные элементы делятся на две группы: скелетные и нескелетные (био-физико-химические зерна), которые подразделяются на основе формы и внутреннего строения**

Строение карбонатной осадочной породы

Форменные элементы (зерна)

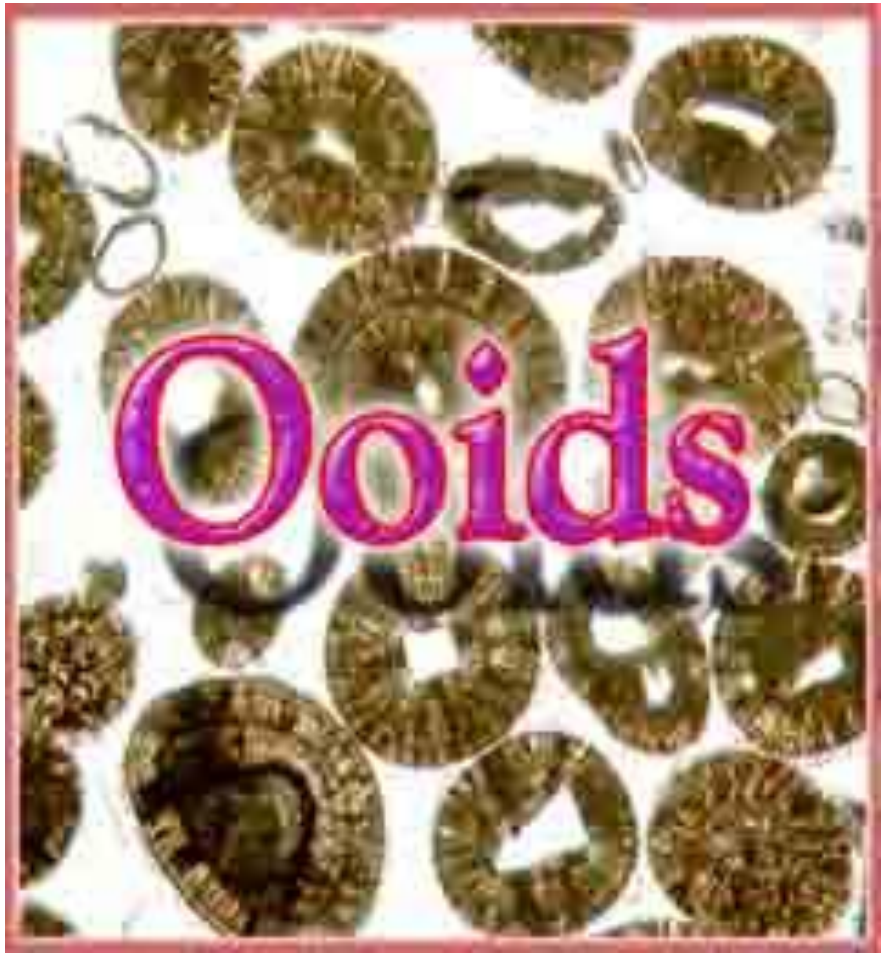


ФИЗИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

1. **Зерна –** ***частицы, слагающие каркас:***

- ***Обломочные зерна*** ***или литокластика (некарбонатный материал из источников сноса за пределами бассейна);***
- ***Внутриформационные обломки*** ***(фрагменты переотложенных карбонатных пород);***
- ***Обломки скелетных частей*** ***организмов (арагонит или кальцит);***
- ***Пелоиды*** ***(бесструктурный криптокристаллический карбонат – выделения известковистых илистых фекальных комочков или результат микритизации органогенных зерен водорослями);***
- ***Онколиты*** ***– индикаторы низкоэнергетических обстановок т. к. образуются за счет примитивных сине-зеленых водорослей, растущих на зерне и прикрепляющих известковый ил к своей липкой поверхности***

ТИПЫ КАРБОНАТНЫХ ЗЕРЕН



- ***Ооиды и оолиты*** *– округлые зерна, имеющие концентрическое и радиальное распределение кристаллов вокруг ядра. По размеру зерна отвечают мелкой песчаной фракции и встречаются в виде больших скоплений.*

Оолиты в современных осадках сложены концентрическими зонами кристаллов арагонита. В древних отложениях – строение оолитов меняется на радиально-лучистое и карбонат представлен кальцитом.

2. Матрикс – карбонатный ил или микрит.

Современные известковые илы сложены арагонитом, древние - кальцитом.

Образуется путем: - истирания обломков раковин и их дезагрегирования на отдельные кристаллики; - как результат биологической деятельности; - результат спонтанной кристаллизации арагонита из морской воды

3. Цемент – кристаллический материал, образованный в пределах каркаса при диагенезе.

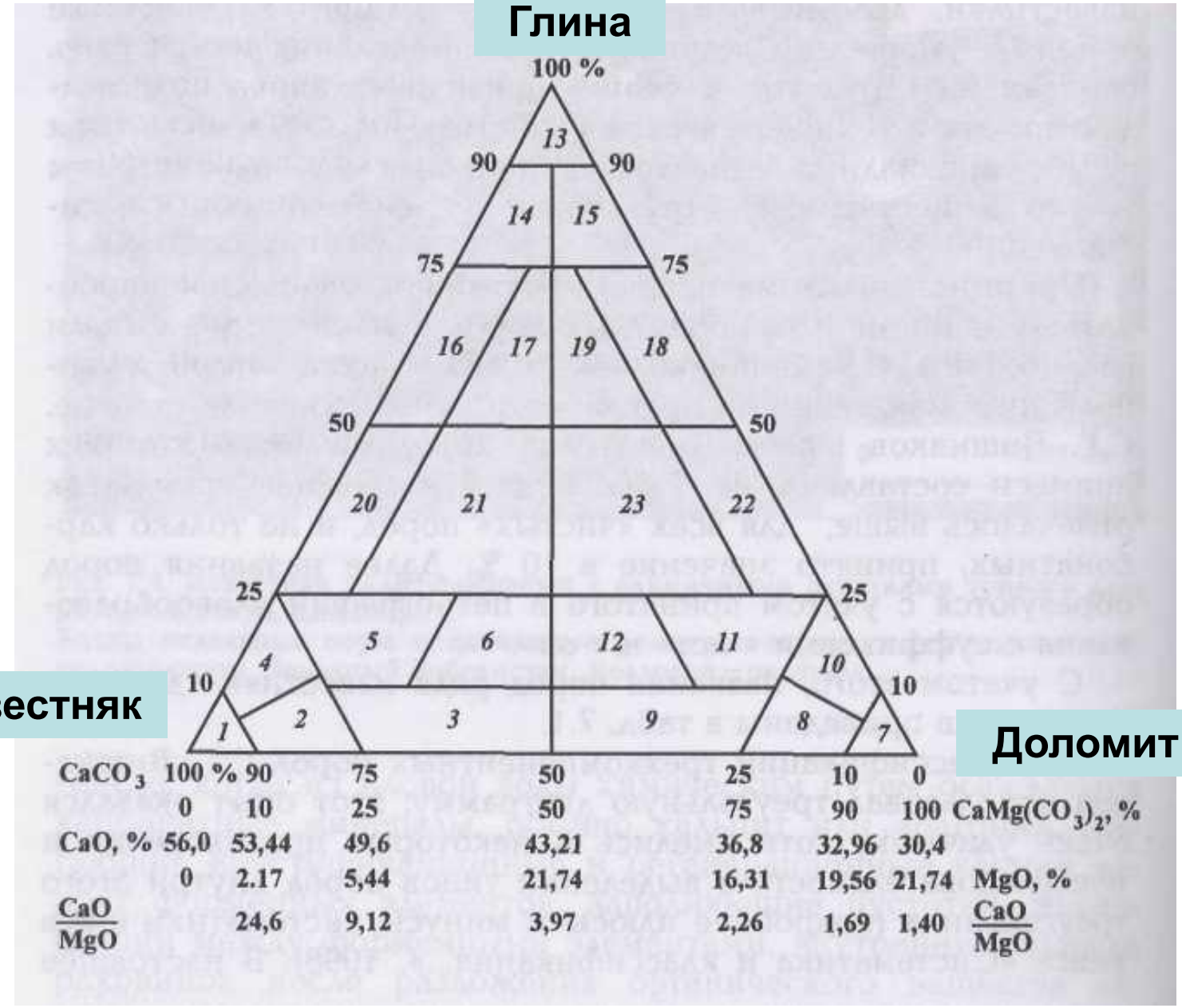
Может состоять из кристаллов различного размера в зависимости от состава, условий кристаллизации и объема заполняющего пространства. Самый распространенный цемент в известняках – ясно-кристаллический кальцит (спарит).

Карбонатный ил - микрит

Классификация известково-доломитовых пород по химико-минералогическому составу (по С.Г.Вишнякову)

Порода	Содержание, %		CaO/MgO
	$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$	
Известняк	90–100	10–0	24,6 и более
Известняк доломитистый	75–90	25–10	9,1–24,6
Известняк доломитовый	50–75	50–25	4,0–9,1
Доломит известковый	25–50	75–50	2,3–4,0
Доломит известковистый	10–25	90–75	1,7–2,3
Доломит	0–10	100–90	1,4–1,7

Схема классификации глинисто-карбонатных пород



Принципиальная схема подразделения карбонатных пород по их структуре

Принципиальная схема подразделения карбонатных пород по их структуре

Структуры	Биоморфные			Зернистые		Кристаллические		Обломочные
	Биогермные (зоо- и фитобиогермные)			Цельнораковинные	Скелетные			
	Ветвистые	Пластинчатые	Обволакивающие (и цементирующие)			Нескелетные (форменные)	Равнозернистые (равнокристаллические, гомеомерные, гомеометрические, гомеометрически-зернистые)	Разнозернистые (разнокристаллические, гетероморфные, гетерометрические, гетерометрически-зернистые)	По размеру и частично по окатанности карбонатных обломков
Примеры пород — известняков (доломитов)	Коралловые, мшанковые, строматопоровые, эпифитоновые, серпуловые и др.	Палеоаплизиновые и др.	Строматолитовые и др.	Ракушняки: фораминиферовые, устричные, птероподовые, гастроподовые, тектакулитовые, сферовые и т.д.	Органогенно-обломочные (детритовые): состоят из определимых обломков органических остатков размером обычно более 0,1 мм	Пизолитовые, оолитовые, псевдооолитовые, онколитовые, комковатые, сгустковые, пелоидные, пеллетовые, сферолитовые, копролитовые, желваковые и т.д.	Пелитоморфные < 0,005 мм Микрозернистые (кристаллические) 0,005—0,05 мм Тонкозернистые (кристаллические) 0,05—0,1 мм Мелкозернистые (кристаллические) 0,1—0,25 мм Среднезернистые (кристаллические) 0,25—0,5 мм Крупнозернистые (кристаллические) 0,5—1,0 мм Грубозернистые (кристаллические) 1,0—2,0 мм Гигантозернистые (кристаллические) > 2,0 мм	Разнозернистые, в том числе порфировидные и др.	Известняковые (доломитовые) брекчии, конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты
	Полибиогермные, полифитовые				Включая мел		Включая туфы и травертины, имеющие крустификационную структуру (точнее, текстуру, так как она характеризуется взаимным расположением кристаллов в пространстве)		

Биоморфные

Зернистые

Кристаллические

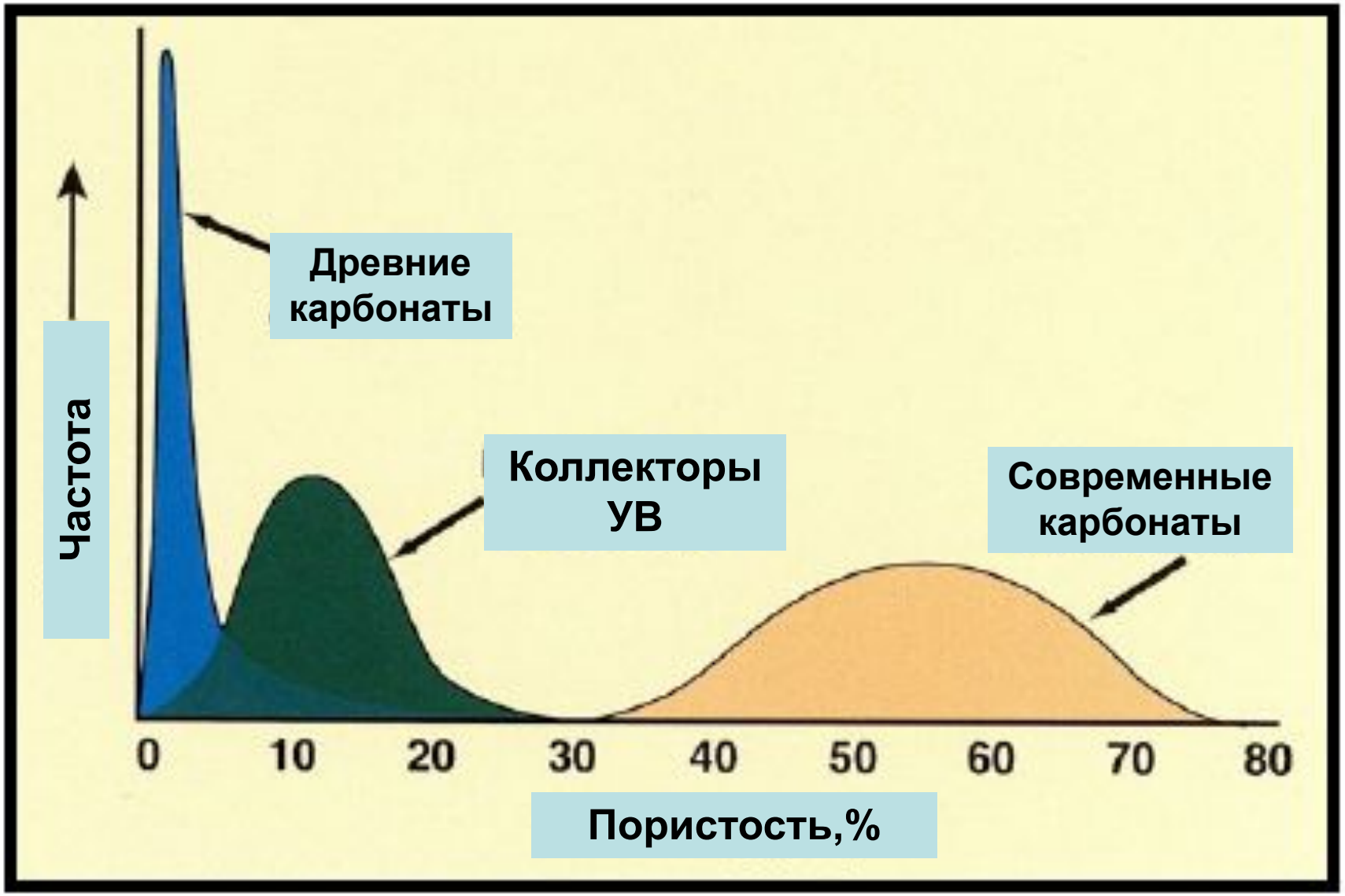
Обломочные

Факторы, определяющие качество пород-коллекторов

Постседиментационные преобразования карбонатных пород

1. Уплотнение и цементация
2. Перекристаллизация
3. Доломитизация
4. Выщелачивание
5. Кальцитизация и сульфатизация
6. Трещинообразование

Снижение пористости в сцементированных известняках по сравнению с современными карбонатами

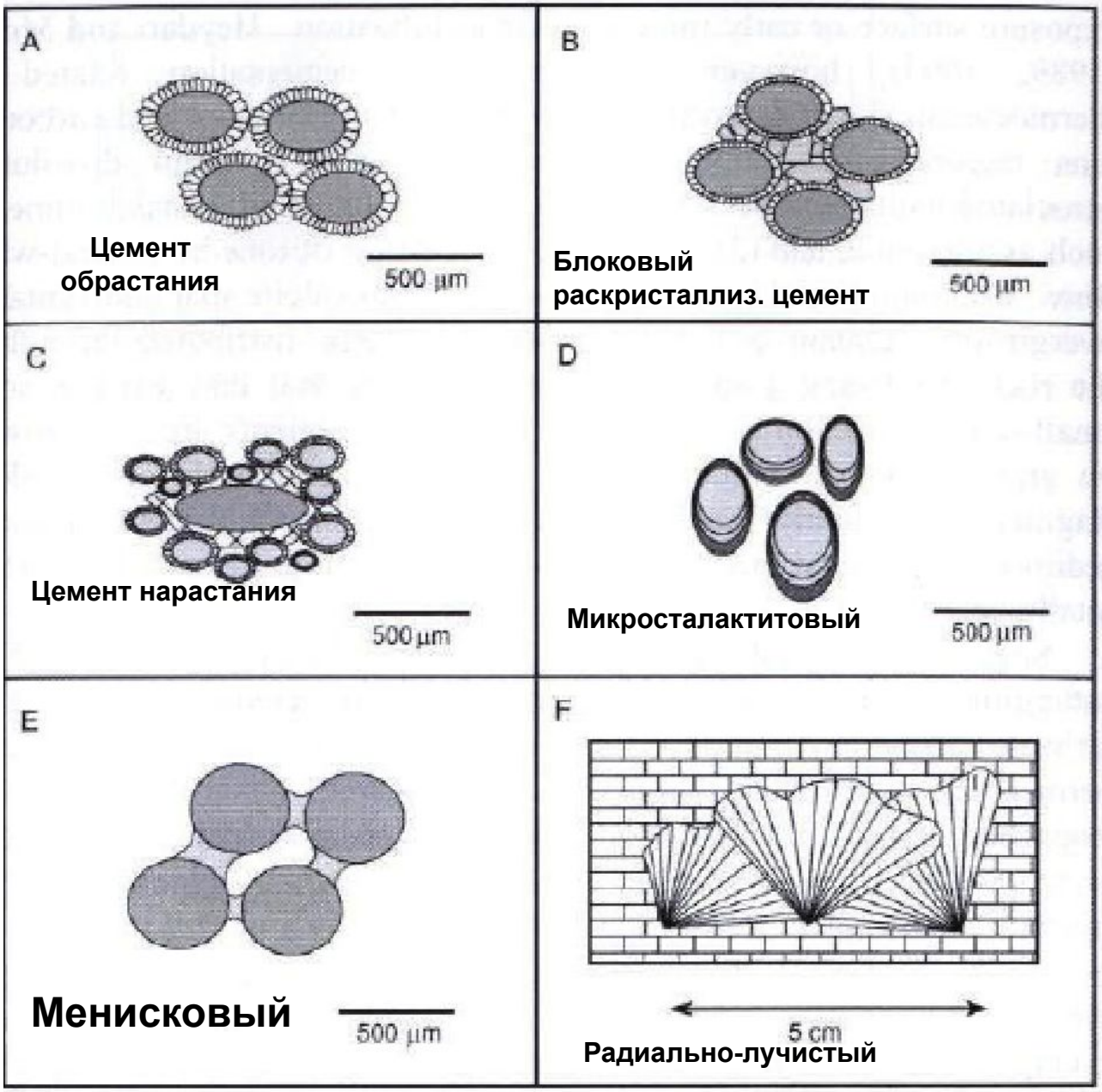


1. Уплотнение и цементация

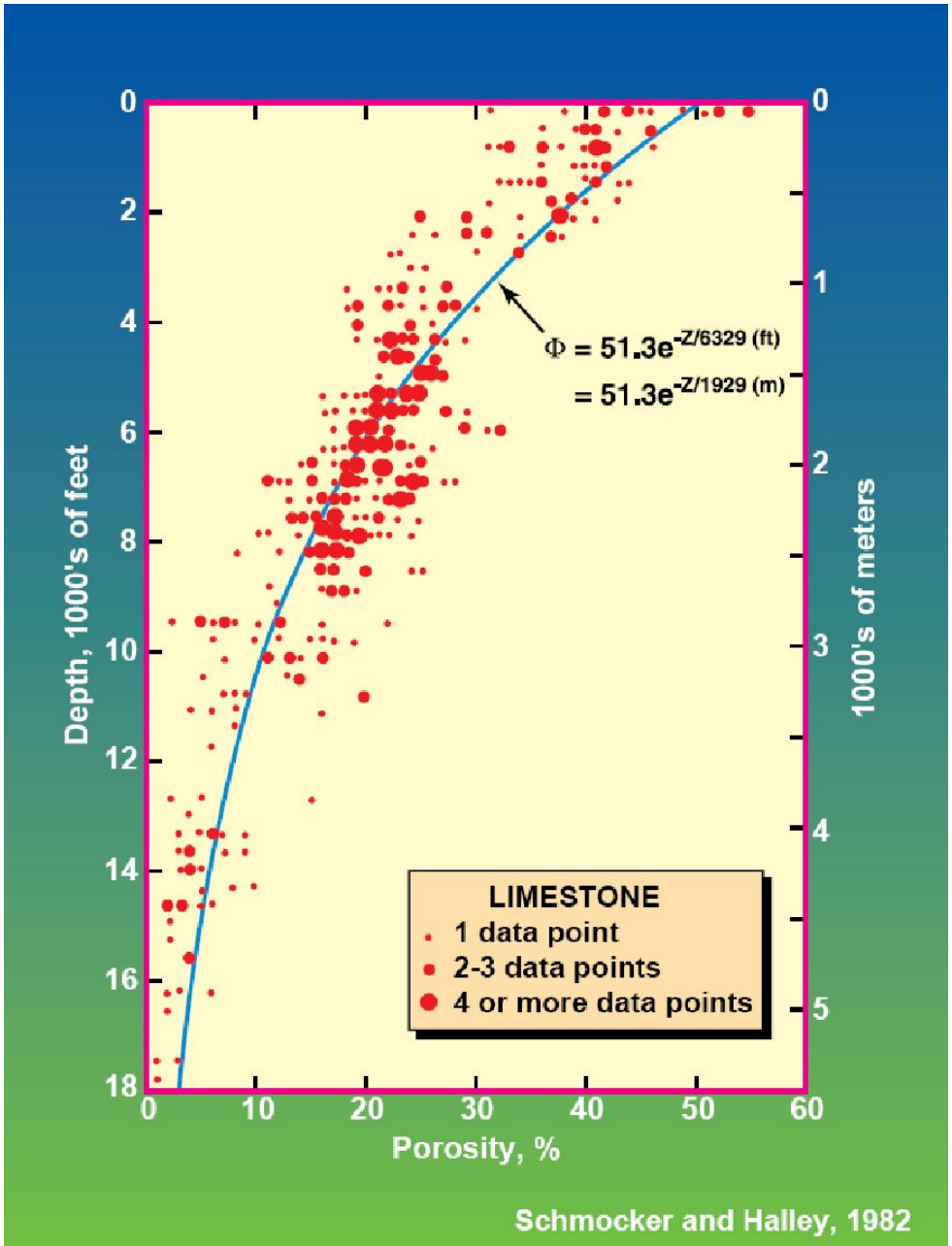
Диа- и катагенетическое уплотнение ведут к увеличению плотности и сокращению пустотного пространства

- Сокращение пористости карбонатных пород с глубиной происходит медленнее, чем обломочных. В месторождениях, лежащих на глубине более 4 км, в ***обломочных породах сосредоточено 18%,*** а в ***карбонатных – 82% запасов УВ***.
- Сравнительно слабая уплотненность карбонатных пород объясняется: 1) относительно быстрой литификацией за счет цементации (в связи с химической неустойчивостью); 2) органогенные образования изначально формируются как твердые породы.
- Цементация является важным фактором: метастабильный арагонит и высокомагнезиальный кальцит перекристаллизовываются в устойчивые кальцит и доломит, что приводит к литификации осадка. Это частично сокращает объем порового пространства, но препятствует уплотнению осадка и снижению пористости.
- Пелитоморфные и микрозернистые карбонатные илы литифицируются за счет цементации, но сохраняют способность к уплотнению при катагенезе.

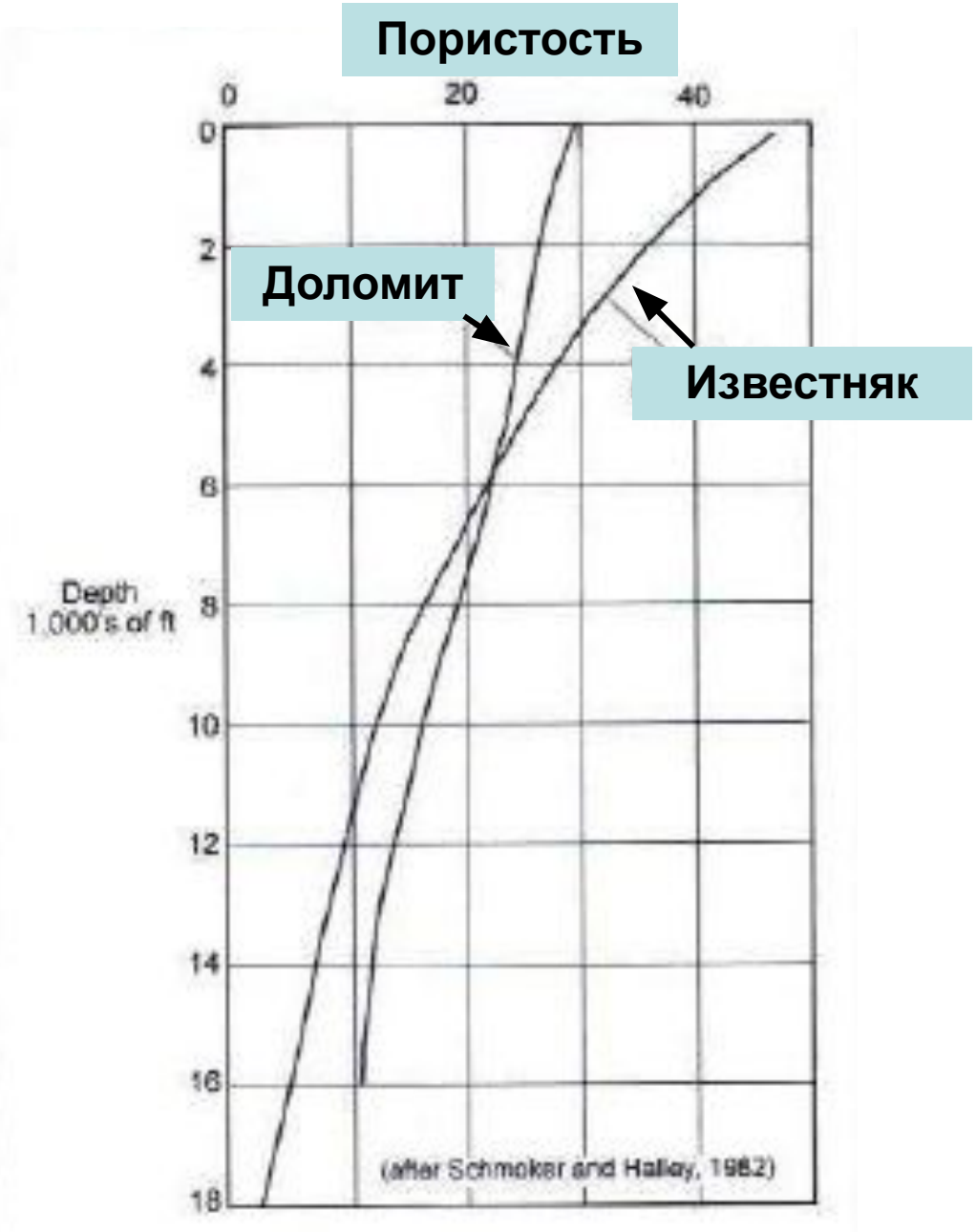
Структуры кальцитового цемента



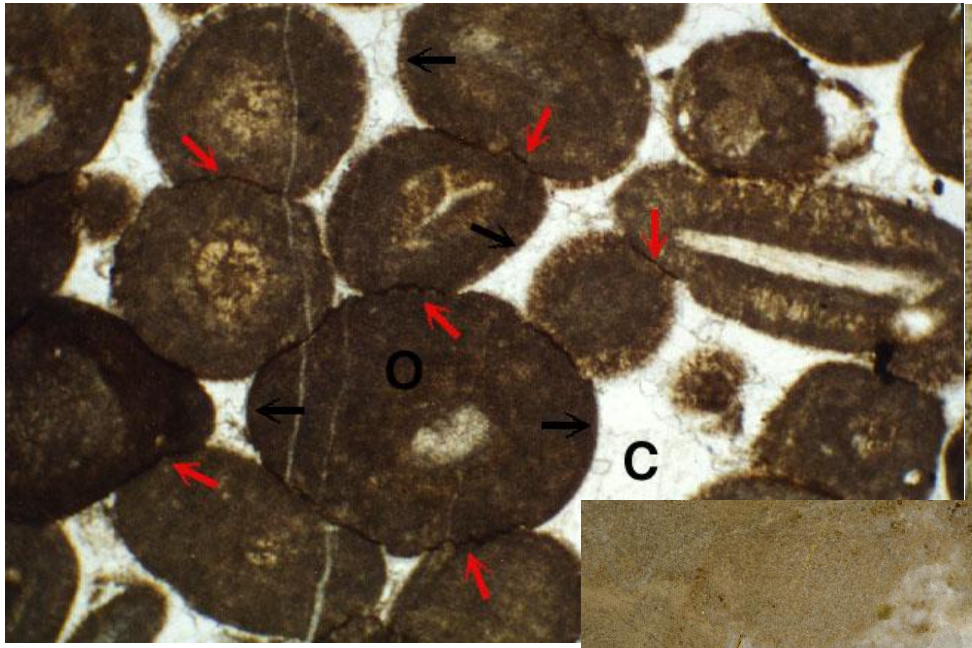
Изменение пористости известняков с глубиной

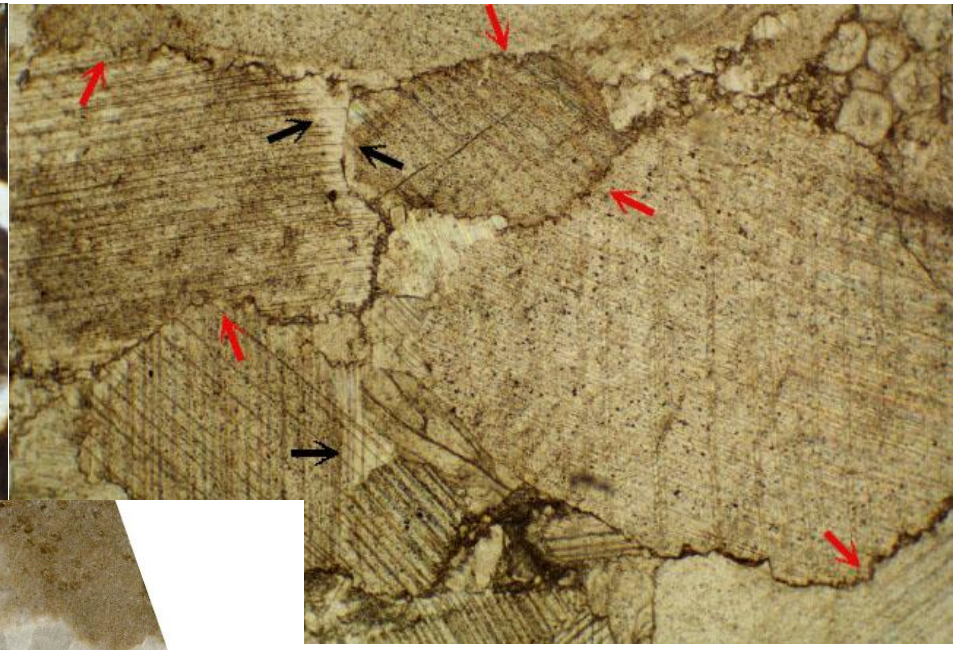


Изменение пористости с глубиной в различных литотипах карбонатных пород (Южная Флорида)



Стилолиты





2. Перекристаллизация

Перекристаллизация – это процесс укрупнения размеров кристаллов без изменения их минерального состава. Она происходит путем растворения первичных зерен и образования новых, но уже более крупных в позднем диагенезе и, главным образом, в катагенезе.

- Перекристаллизация связана с наличием пластовых вод и наиболее развита в породах, имеющих первично высокую пористость и проницаемость.
- Интенсивная перекристаллизация отмечается в биоморфных, биогермных, органогенно-обломочных известняках, а относительно слабая – в микрозернистых.
- Наличие глинистого, кремнистого, дисперсного органического вещества снижает способность к перекристаллизации.
- Результаты перекристаллизации по данным разных авторов различны: 1) перекристаллизация ведет к уменьшению пористости; 2) перекристаллизация ведет к увеличению пористости: ***микрозернистые известняки 4,6%, микротонкозернистые 7,1%, тонкозернистые – 9,4%. У доломитов до 10-15%***
- Причины увеличения открытой пористости: 1) не весь карбонатный материал, переходящий в раствор, затем вновь кристаллизуется; часть его выносится пластовыми водами, что ведет к общему увеличению пустотности; 2) при образовании более крупных кристаллов формируются более крупные межкристаллические поры и соответственно межпоровые каналы.

3. Доломитизация

- ***Доломитизация*** – процесс замещения кальцита доломитом:

$2CaCO_3 + MgSO_4 = CaMg(CO_3)_2 + CaSO_4$ (реакция Гайдингера)

$2CaCO_3 + MgCl_2 = CaMg(CO_3)_2 + CaCl_2$ (реакция Мариньяка)

Два моля исходного кальцита с плотностью 2,71 г/см3 занимают объем 73,8 см3, а один моль образовавшегося доломита с плотностью 2,85 г/см3 занимает объем 64,8 см3. Сокращение объемов твердой фазы карбонатов составляет, таким образом, 12,2%; на эту величину и должен теоретически возрастать объем пустотного пространства.

Диагенетическая доломитизация практически не изменяет коллекторские свойства поскольку диагенетическое уплотнение ликвидирует дефицит объема и увеличения пористости не происходит.

3. Доломитизация

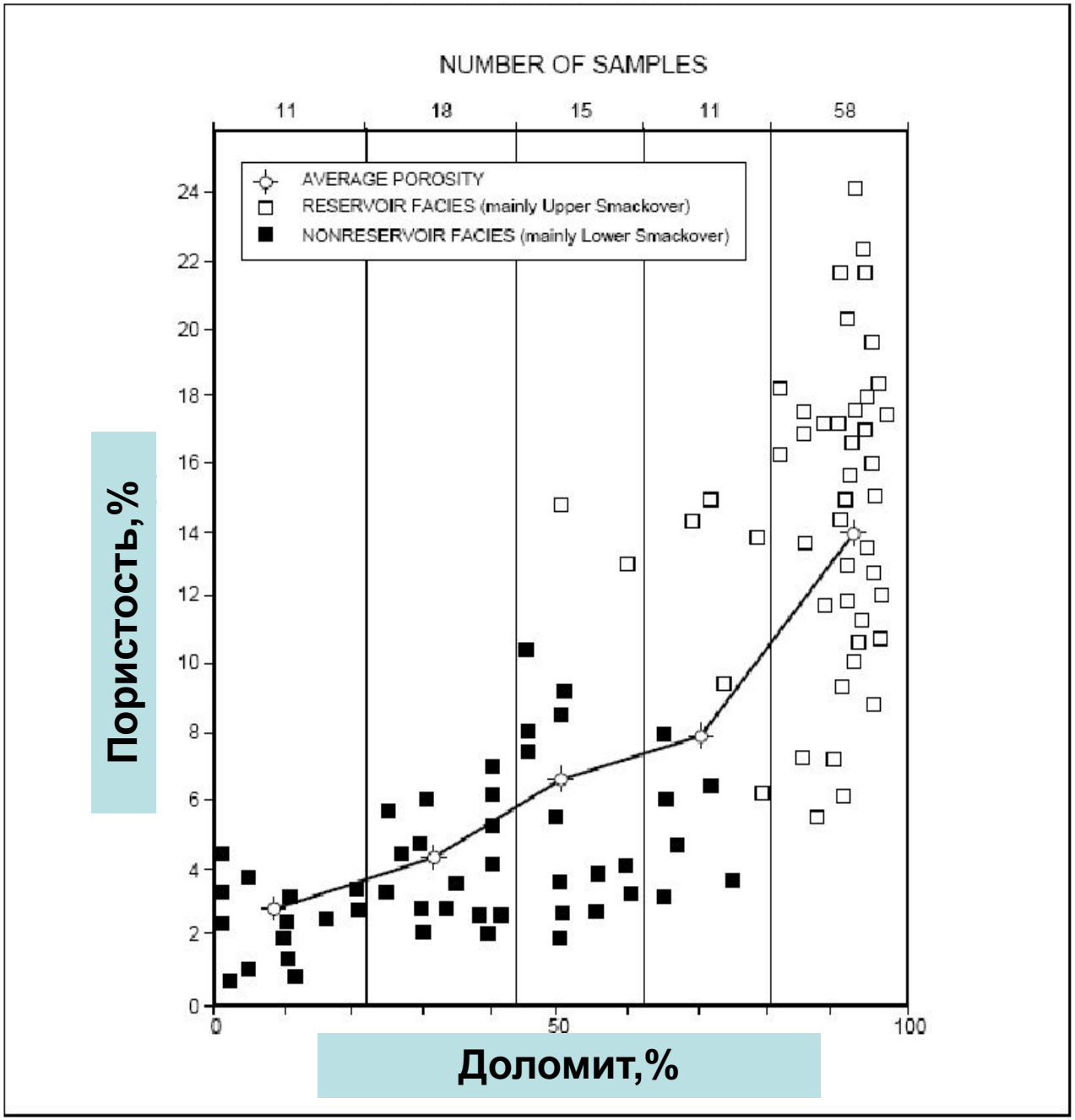
При катагенетической метасоматической доломитизации, которая происходит в жесткой, не поддающейся дальнейшему уплотнению карбонатной толще, сокращение объема твердой фазы ведет к увеличению пустотного пространства.

Если доломитизация идет по реакции Мариньяка, то хлорид кальция из-за своей высокой растворимости находится в растворе; если же по схеме Гайдингера – образующиеся сульфаты кальция могут выпадать в виде гипса (ангидрита), заполняя часть пустотного пространства.

Доломитизация может увеличить пористость на величину 10-13% абс. Эффект зависит от пористости известняка до этапа доломитизации. Известняк с пористостью 30% при полной доломитизации увеличивает пористость на 9%. Если пористость известняка составляет 5%, то при доломитизации она может увеличиться до 11,7%.

Ощутимый эффект достигается при 70% доломитизации известняка

Соотношение пористости и концентрации доломита



Изменение пористости при доломитизации различных структурных типов известняков

4. Выщелачивание

- **Арагонит, кальцит и доломит легко растворяются в присутствии углекислоты:**

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$$

тв. фаза **раствор**

1. При диагенезе происходит слабое растворение карбонатов и их повторное осаждение. Это приводит к перераспределению вещества, укрупнению размеров кристаллов и литификации осадка.

2. При катагенезе растворение сопровождается выносом вещества, т.е. выщелачиванием. Для этого необходимо: наличие проницаемых пород и фильтрация по ним, что обеспечивает приток новых порций воды и вынос образовавшихся растворов. Благоприятны первично пористые и трещиноватые породы.

4. Выщелачивание

3. При восходящих тектонических движениях карбонатные породы последовательно проходят хлоридную, сульфатную и гидрокарбонатную гидрохимические зоны. В ***сульфатной зоне*** преимущественно растворяется ***доломит***, в ***гидрокарбонатной*** идет активнее выщелачивание ***кальцита***.

4. С глубины 1,5-2,0 км растворимость карбонатов повышается. При температурах 75-125С карбонаты в воде разрушаются с выделением углекислоты, что увеличивает растворение.

Особенности пустотного пространства при выщелачивании:

1. Неравномерность пустот по величине и форме
2. Сравнительно большие размеры и ширина каналов
3. Неравномерность распределения пустотного пространства, что ведет к увеличению анизотропии коллекторов
4. Связь с литолого-фациальным составом отложений, приуроченность к биоморфным, органогенно-обломочным породам, зонам трещино- и стилолитообразования.

Пустоты выщелачивания в различных литотипах карбонатных пород

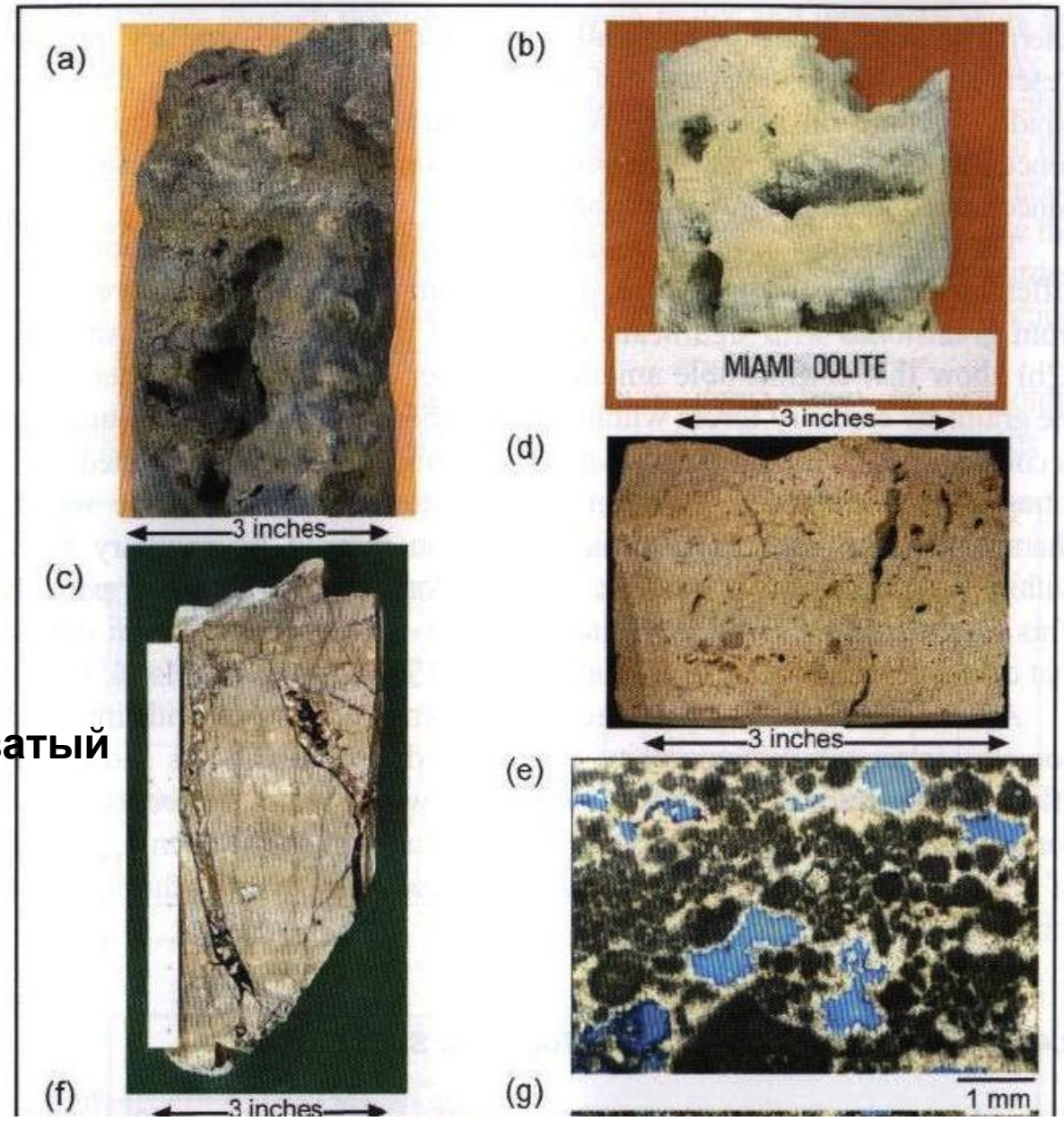
Органогенный известняк

Оолитовый известняк

Трещины выщелачивания

Трещиноватый доломит

Фенестральные пустоты



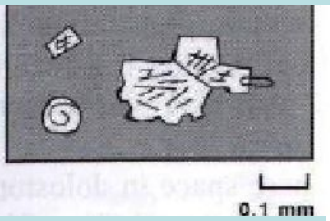
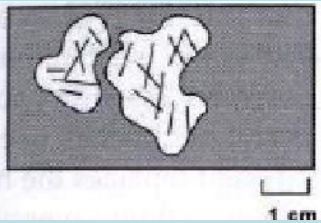
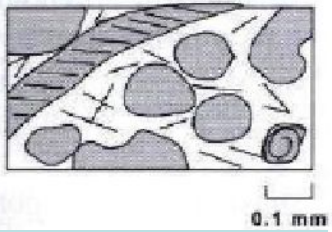
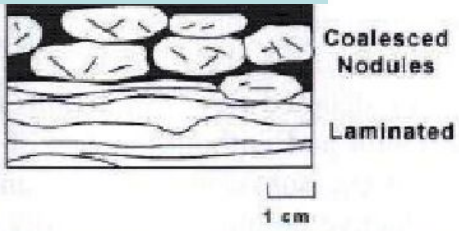
5. Кальцитизация и сульфатизация

- **На стадии диагенеза *кальцитизация* связана с инверсией арагонита в кальцит. При этом объем кальцита на 9% превосходит объем арагонита (плотность арагонита составляет 2,9-3,0 г/см3, кальцита 2,6-2,8 г/см3). Этот процесс ведет к сокращению пустотного пространства.**
- **Диагенетическая кальцитизация из иловых вод ведет к литификации, что также уменьшает пористость.**
- **На стадии катагенеза из пластовых вод формируются крупные кристаллы кальцита в порах, кавернах и трещинах, что уменьшает пустотное пространство.**
- ***Сульфатные минералы* в виде гипса и ангидрита нередко встречаются в карбонатных породах. Они могут быть результатом первичного осаждения совместно с хемогенными доломитами, когда образуется целый ряд переходных разностей от слабосульфатных доломитов к смешанным ангидрит-доломитовым породам и ангидритам. Такие породы обладают низкими коллекторскими свойствами.**

5. Сульфатизация

- **Образование гипса происходит при катагенетической доломитизации (реакция Гайдингера).**
- **Возможно выпадение сульфатов из пластовых вод при изменении термобарических условий и солевого состава этих вод.**
- **Сульфаты кальция вносятся в карбонатные породы из вышележащих соленосных толщ.**
- **Могут образоваться путем микробиологического окисления серы в зоне водонефтяного контакта.**

Структуры гипса и ангидрита в карбонатных породах и их влияние на пустотность

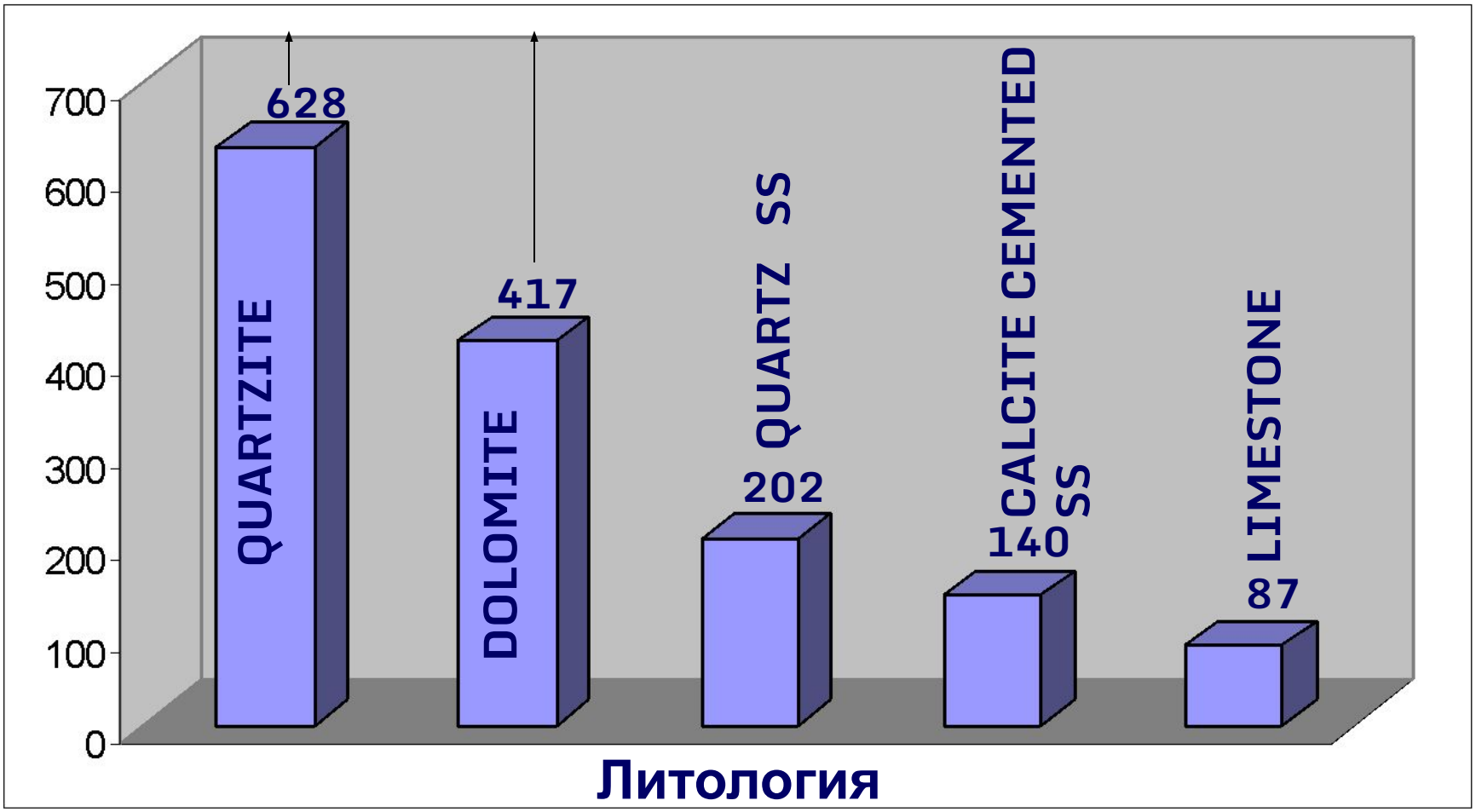
Структура	Влияние на свойства коллектора
Пойкилитовая 	Неоднородное (пятнистое) распределение. Матричная пористость снижается, размер пор не меняется.
Нодулярная 	Неоднородное распределение. Матричная пористость снижается, размер пор не меняется.
Выполнения пор 	Однородное распределение. Межзерновая пористость и проницаемость снижаются
Полосчатая 	Линейное распределение. Непроницаемые перегородки

6. Трещинообразование

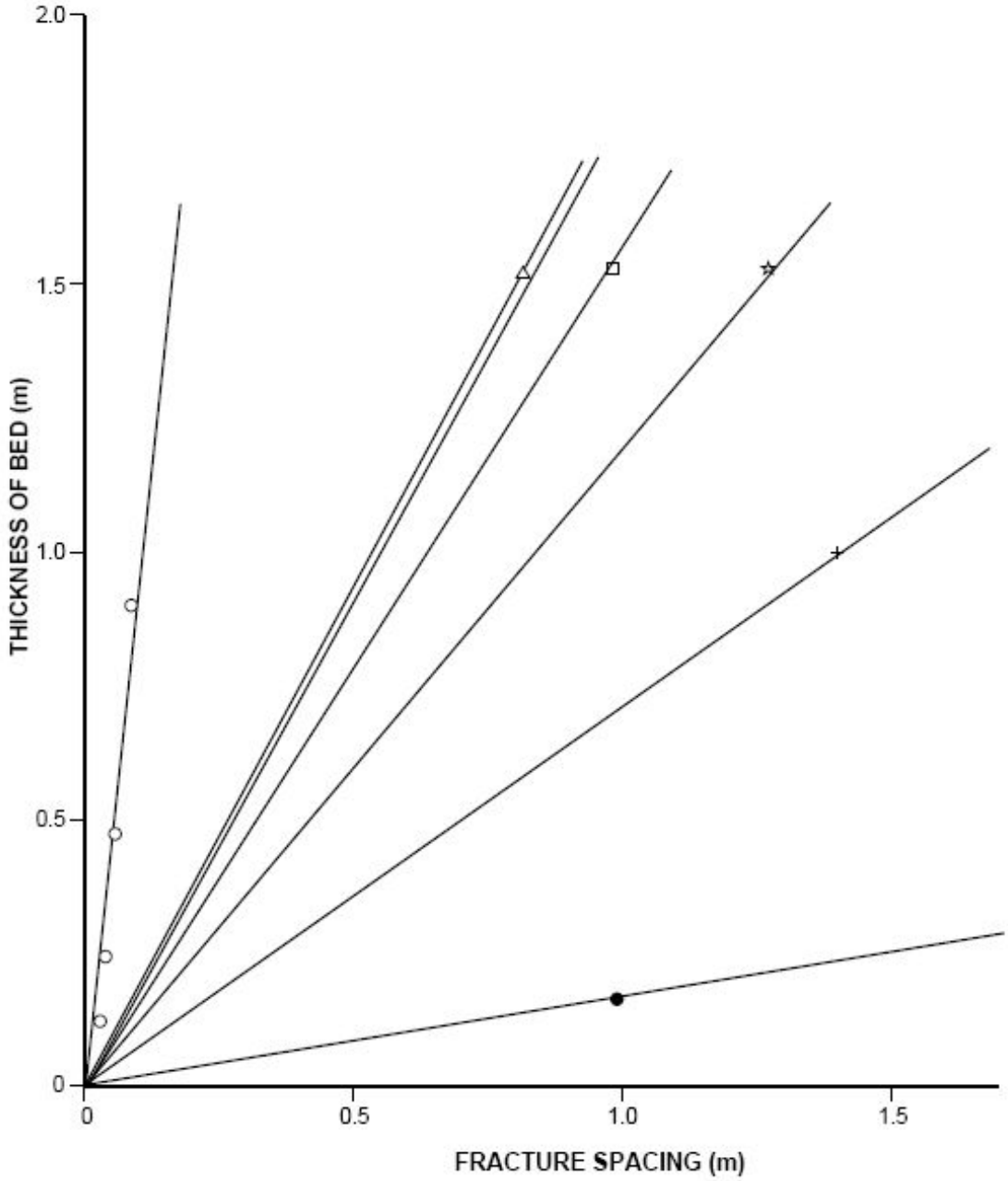
- ***Тектонические трещины:*** прямолинейные, стенки ровные или шероховатые, пересекают или огибают зерна и форменные элементы. Могут быть открытые со следами желтого битума или целиком минерализованы. Открытые трещины чаще всего являются эффективными и принимают участи в фильтрации флюидов. ***На малых глубинах (до 1 км) открытые трещины имеют наибольшую ширину (до 50 мкм), на средних (3-4 км) – 20-25 мкм, на глубинах больше 4 км – 10-15 мкм.***

Влияние литологии

Интенсивность трещиноватости является функцией литологии



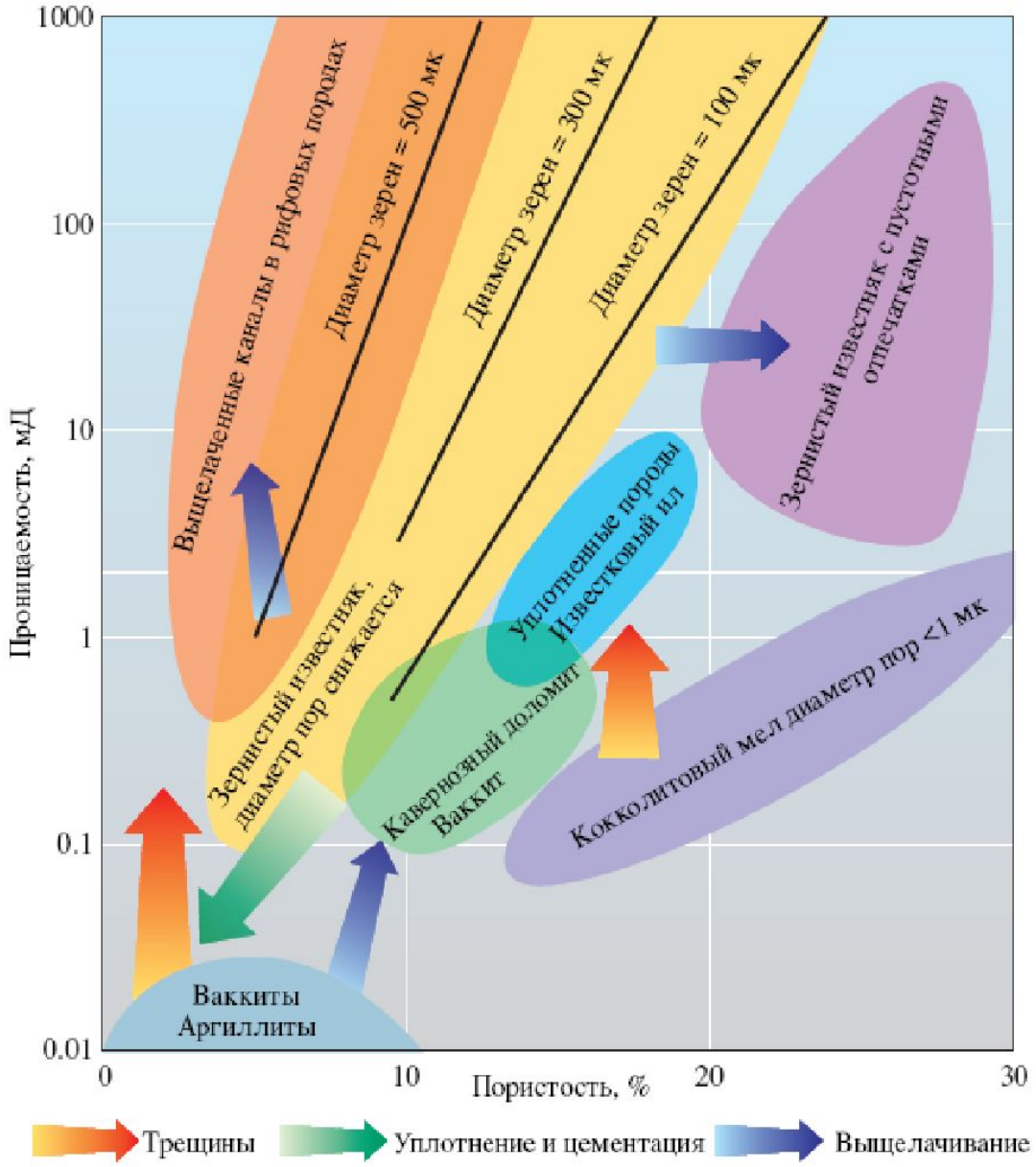
Плотность трещин как функция мощности слоя



Чем меньше мощность слоя, тем плотнее трещиноватость

Масштабы трещин

Взаимосвязь пористости и проницаемости для карбонатных пород с учетом вторичных преобразований

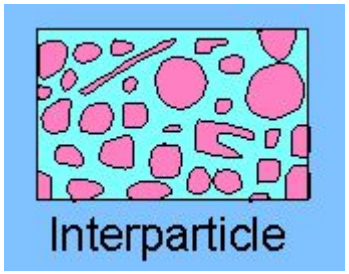


Типы пустотного пространства

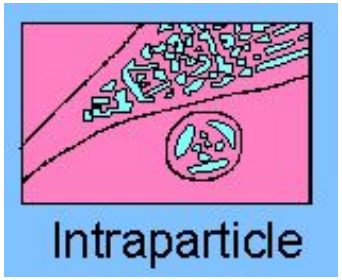
Типы пористости в карбонатах

Межзерновая	Поры между частичками или зернами
Внутризерновая	Поры внутри отдельных частичек или зерен
Межкристаллическая	Поры между кристаллами
Молдическая	Поры, образованные путем растворения отдельных зерен или кристаллов в породе
Фенестральная	Первичные поры больше, чем образованные зернами пустоты
Трещиноватость	Формируется при плоскостном разрыве породы
Каверны	Большие поры, образованные путем смешанного растворения цемента и зерен

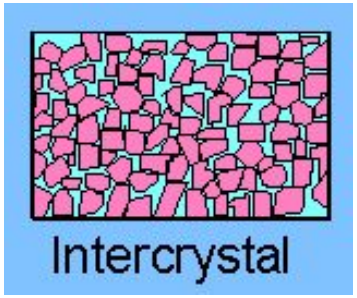
КЛАССИФИКАЦИЯ ПОРИСТОСТИ КАРБОНАТОВ ПО ПРЕЮ



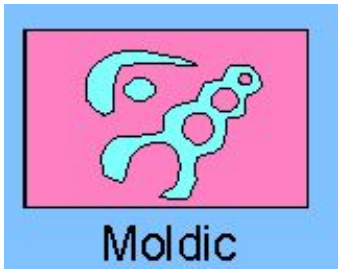
Избирательная межзерновая пористость



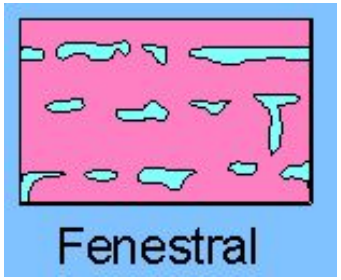
Внутризерновая пористость в первоначальных зернах каркаса



Межкристаллическая пористость внутри кристаллизованного микрита или доломита

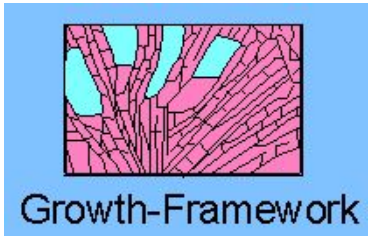


Пористость отпечатков в результате растворения зерен

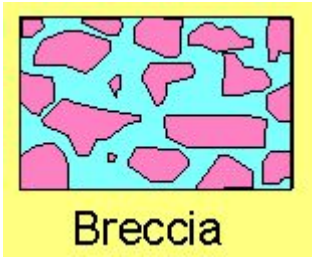


Крупномасштабная пористость каркаса, называемая фенестральной; возникающая при растворении водорослевых микритовых отложений

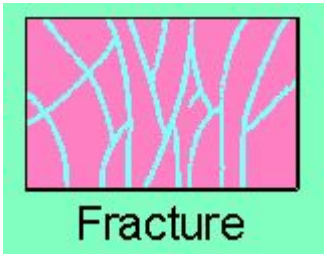
Первичная пористость, описывающая поровое пространство, сохраняющееся в результате больших перекрывающих зерен



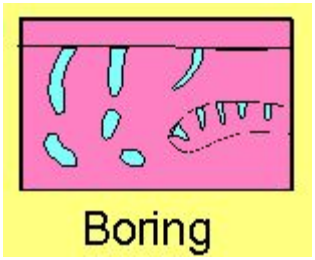
Пористость роста каркаса, являющаяся естественным продуктом жизнедеятельности рифов

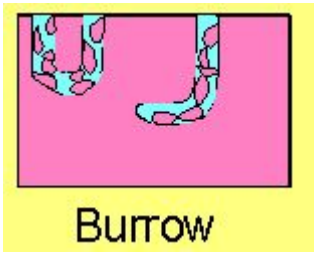


Похожая на брекчию

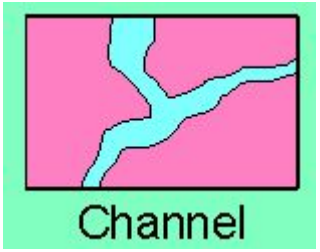


Неизбирательная трещинная пористость

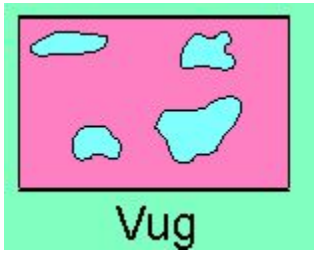




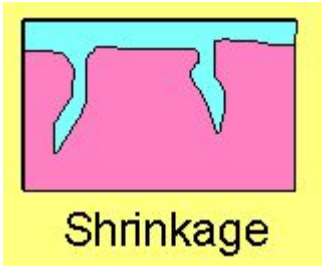
Ходы илоедов



Канальная пористость вызванная интенсив-ным выщелачиванием



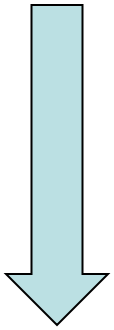
Кавернозная пористость, возникающая в результате обширного растворения материала и не сохраняю-щая следов первоначаль-ного зерна



Усадочная

Структурно-генетическая/петрофизическая классификация коллекторов

Важнейший фактор при интерпретации карбонатов



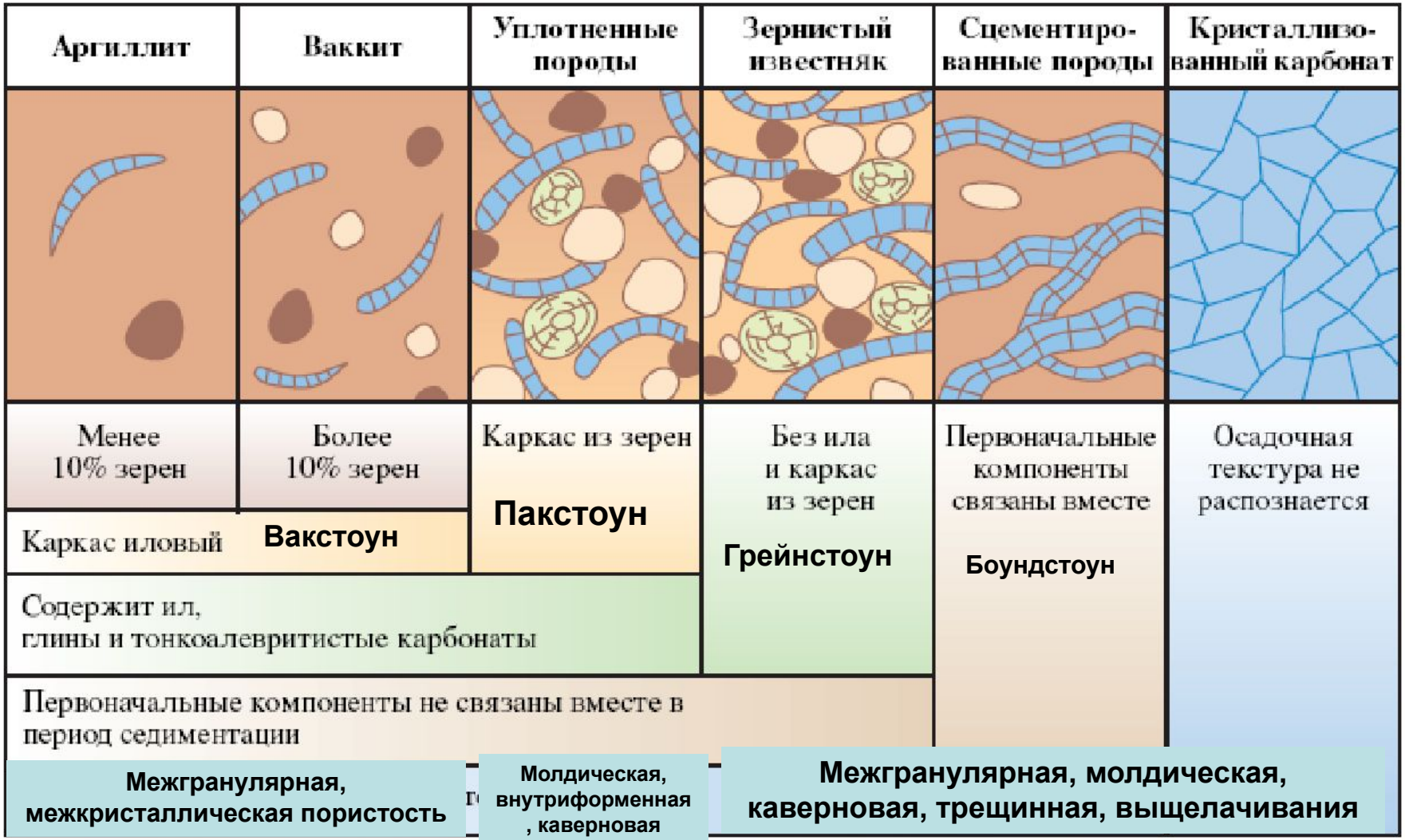
Классификация многочисленных форм сосуществования зерен и матрицы

Схемы классификации карбонатов зарубежных авторов

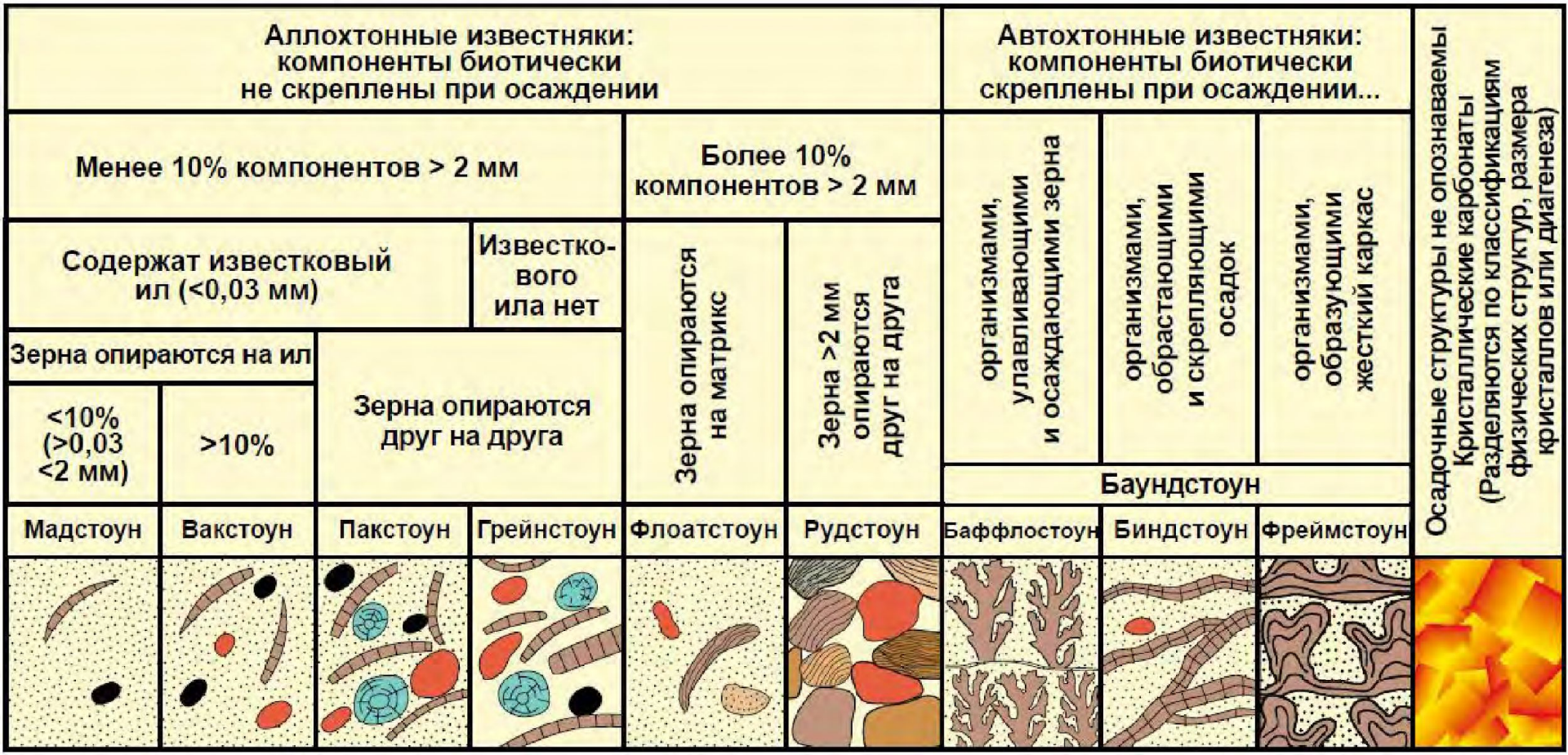
Фолк (1959) ***– основана на типе зерна и преобладании яснокристаллического цемента или микрита***

Данхэм (1962) ***– основана на структуре осадка. Не учитывается тип обломка или цемента***

Классификация Данхэма



Модифицированная классификация Ф.Данема (Embry & Klovan, 1971)



Классификации карбонатных пород

Построены на структурно-вещественных и генетических признаках

Татарского (195

Вишнякова (1933)

Danhem (1962)

Киркинская, Смехов (1981)

Страхов (1956)

Теодорович (1950)

Хабаров (1985)

Структурно-вещественная классификация карбонатных пород (Хабаров Е.М.,1985)

первично-осадочная структура распознаваема				первичная структура нераспознаваема
первичные компоненты не были скреплены во время отложения			первичные компоненты были скреплены во время отложения	**яснокристаллические породы,** разделяются по размерам кристаллов:
зерен < 10%	**зерен 10-50%**	**зерен >50%**		
микритовые известняки (доломиты)	**микритово-зернистые** известняки (доломиты): с оолитами с пизолитами с комками с интракластами с биокластами	**зернистые** известняки (доломиты): оолитовые пизолитовые комковатые интракластические биокластические	**биоморфные** известняки (доломиты): строматолитовые коралловые мшанковые строматопоровые и т.д.	мелкокристаллические (0,05-0,25мм) среднекристаллические (0,25-0,5мм) крупнокристаллические (0,5-1,0мм) грубокристаллические (>1 мм)

Методика ВНИГНИ

КЛАССИФИКАЦИЯ КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Выделено 5 генетических групп карбонатных отложений

I. Генетическая группа рифовые отложения

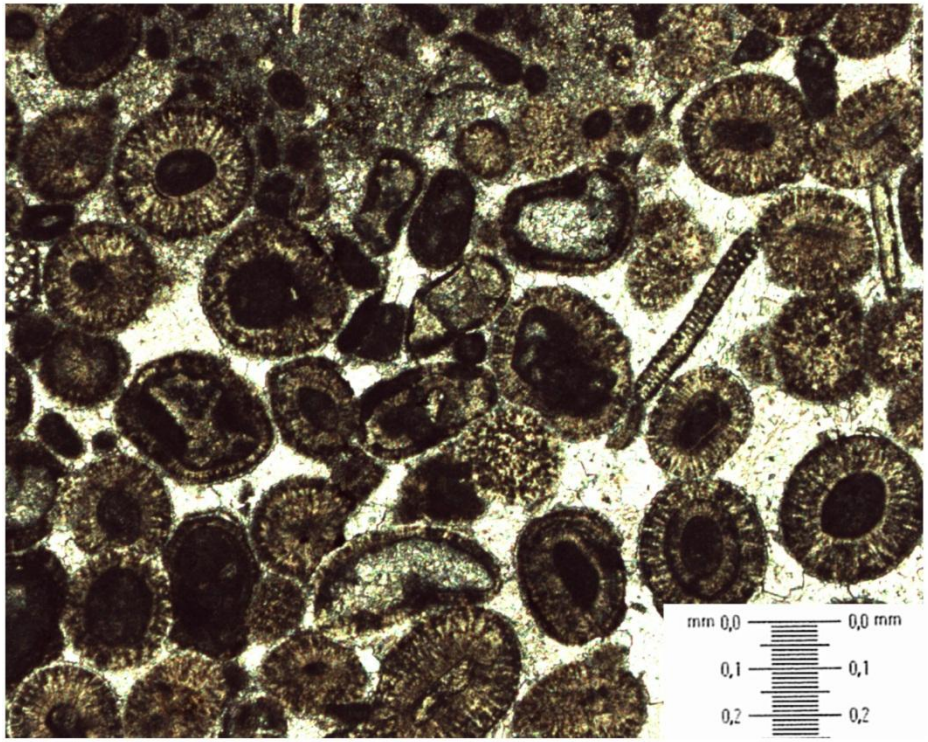
1. Генетическая подгруппа собственно рифовая

1. Генетический тип – биогермные отложения
2. Генетический тип – межбиогермные отложения
3. Генет ический тип – отложения тыловых шлейфов
4. Генетический тип - отложения передовых шлейфов
5. Генетический тип – лагунные отложения

КАЖДОЕ ГЕНЕТИЧЕСКОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИЗУЕТСЯ СТАНДАРТНЫМИ ФОРМУЛАМИ СТРУКТУР

ИЗУЧЕНИЕ КАРБОНАТНЫХ БЕНТОГЕННЫХ ФОРМАЦИЙ СИЛУРА, ДЕВОНА, ТРИАСА, ЮРЫ, МЕЛА, ПАЛЕОГЕНА И НЕОГЕНА ПОЗВОЛИЛО ВЫЯВИТЬ 78 СТАНДАРТНЫХ ЛИТОТИПОВ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Компоненты карбонатной породы в шлифе и структурная формула литотипа



Структурная формула

$$\frac{Оо_{(4-3)}\ Об_3\ Д_2}{Ка_{(1-2)}}$$

Литогенетический тип:

- №29 – тонко-оолитовый известняк

Генетический тип отложений:

-Баровые отложения

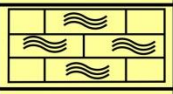
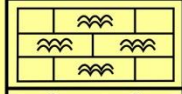
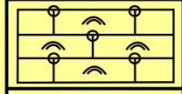
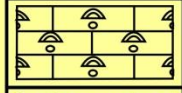
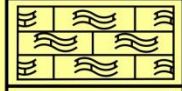
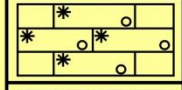
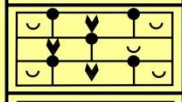
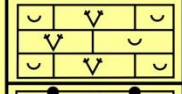
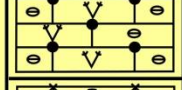
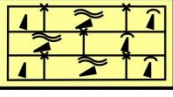
Генетическая группа отложений:

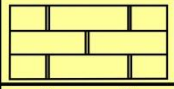
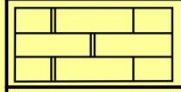
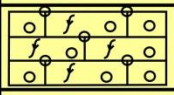
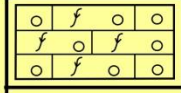
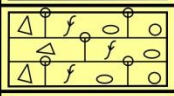
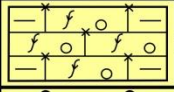
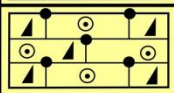
- Отложения открытого шельфа

Состав структурных компонентов: оолиты (Оо), обломки (Об), детрит (Д), кристаллический кальцит (Ка)

Оолиты 30-40%, обломки 30%, детрит 20%, кристаллический кальцит в цементе 10-20%

Формулы структур стандартных литотипов карбонатных пород

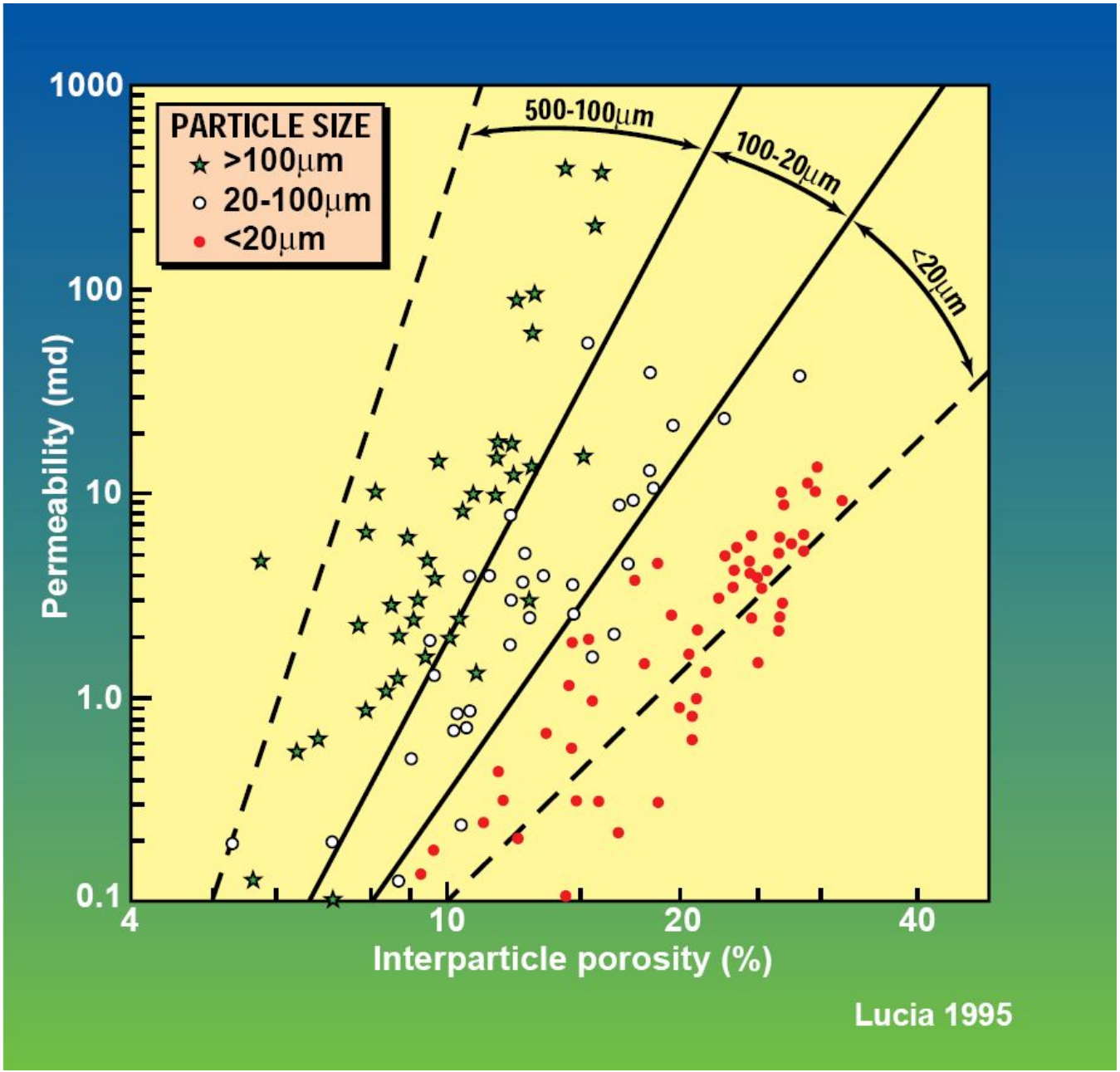
Genetic group of deposits	Genetic type of deposits	Symbol of lithotypes	№ of lithotypes	Formula of lithotype	Term by Dunham classification
REEFAL	BIOHERMAL		1	$\frac{Рс_{(8-9)}}{Ка_{(1-2)}Дл_{(2-1)}}$	boundstone
			2	$\frac{Рс_{(8-9)}}{Ка_{(2-1)}}$	framestone
			3	$\frac{Рс_{(5-6)}Оо_{(2-3)}Об_{1}}{Ка_{(1-2)}}$	framestone
			4	$\frac{Рс_{(5-6)}Об_{(2-3)}}{Ка_{(1-2)}}$	framestone
			5	$\frac{Рс_{8}С}{Ка_{1}К_{1}}$	framestone-boundstone
			6	$\frac{Рс_{(6-7)}}{Об_{(2-3)}Ка_{(1)}}$	framestone
			7	$\frac{Рс_{(5-6)}Об_{(2-3)}}{Ка_{1}}$	framestone
			8	$\frac{Рс_{(4-5)}Д_{2}Об_{(1-0)}С}{К_{3}}$	bufflestone
			9	$\frac{Рс_{3}Д_{2}С}{Ш_{2}К_{2}П_{1}}$	bufflestone
			10	$\frac{Рс_{3}Рк_{2}Д_{1}С}{К_{2}П_{2}}$	bufflestone
			11	$\frac{Рс_{1}Гб_{2}Д_{2}Он_{(1-0)}Кон_{1}С}{Ш_{2}К_{(1-2)}}$	framestone
			12	$\frac{Рк_{4}Д_{3}С}{Дл_{1}Ш_{2}}$	packstone

Genetic group of deposits	Genetic type of deposits	Symbol of lithotypes	№ of lithotypes	Formula of lithotype	Term by Dunham classification
REEFAL	INTERBIOHERMIC BIOHERMAL		13	$\frac{Рс_{(2-3)}Кон_{(1-0)}}{Дл_{(6-8)}}$	———
			14	$\frac{Ка_{(5-2)}}{Дл_{(5-8)}}$	———
			15	$\frac{Он_{1}Об_{(1-2)}Д_{2}С}{Ш_{2}К_{2}П_{(2-1)}}$	packstone
			16	$\frac{Д_{2}С}{Дл_{3}П_{5}}$	mudstone
			17	$\frac{Д_{2}С}{Дл_{8}}$	———
	BACKREEF TALUS		18	$\frac{Об_{(2-4)}Оо_{(2-4)}Д(_{(1-2)}С}{Ка_{(3-2)}}$	granestone
			19	$\frac{Об_{(3-5)}Д_{(3-1)}С}{Ш_{(2-0)}Ка_{(2-4)}}$	granestone
			20	$\frac{Гр_{4}Д_{4}С}{Ка_{2}}$	floatstone
			21	$\frac{Об_{3}Оо_{3}Га_{(1-2)}Гр_{(1)}}{Ка_{(1-2)}}$	floatstone
	FOREREEF TALUS		22	$\frac{Д_{2}Об_{2}С}{К_{3}Ш_{3}}$	packstone
			22A	$\frac{Об_{3}Д_{2}С}{Ш_{2}П_{3}}$	packstone
	LAGOONAL		23	$\frac{Оо_{(1-0)}Об_{(2)}Д_{1}Он_{2}В_{1}}{К_{(2-3)}П_{(1-0)}}$	granestone

Структурная/петрофизическая классификация Д. Лусиа (учитывает влияние процессов осадконакопления и диагенеза)

- Поровое пространство разделено на три класса: *1) межчастичная пористость; 2) изолированно-каверновая пористость; 3) взаимосвязанно-каверновая пористость*
- Каждый класс имеет различный тип распределения пор по размеру и характеру взаимосвязей между ними
- Размер межчастичных пор (1 класс) контролируется размером и сортировкой частиц, а также объемом межчастичного цемента
- *Области проницаемости для межчастичных пор выделяются по граничным размерам частиц, равным 100 и 20 мкм.*
- Породы разделены на: 1) преимущественно зернистые и, 2) преимущественно глинистые

Пористость и проницаемость для различных классов крупности зерен



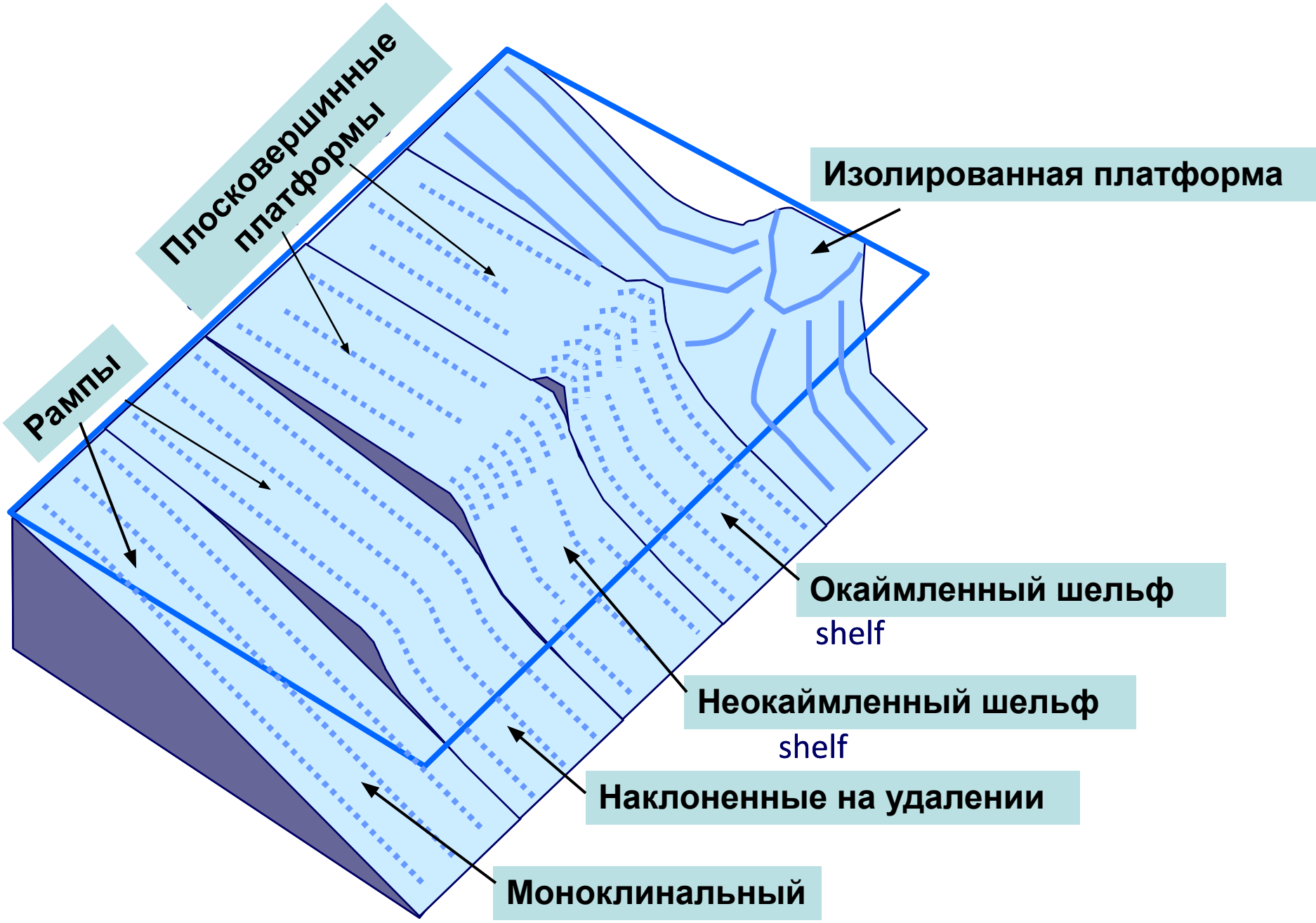
Модели карбонатного осадконакопления

Условия образования

Карбонатные породы формируются в разнообразных фациальных обстановках от ***одиночных рифов (1)*** площадью первые-десятки кв. км, крупных ***изолированных карбонатных отмелей (банки 2)*** в десятки-сотни кв. км до гигантских ***карбонатных платформ (3),*** охватывающих тысячи кв. км. Эти платформы подразделяются:

1) ***Изолированные, окаймленные/неокаймленные с крутым склоном у шельфового края;***
2) ***слабонаклоненный карбонатный рамп.***

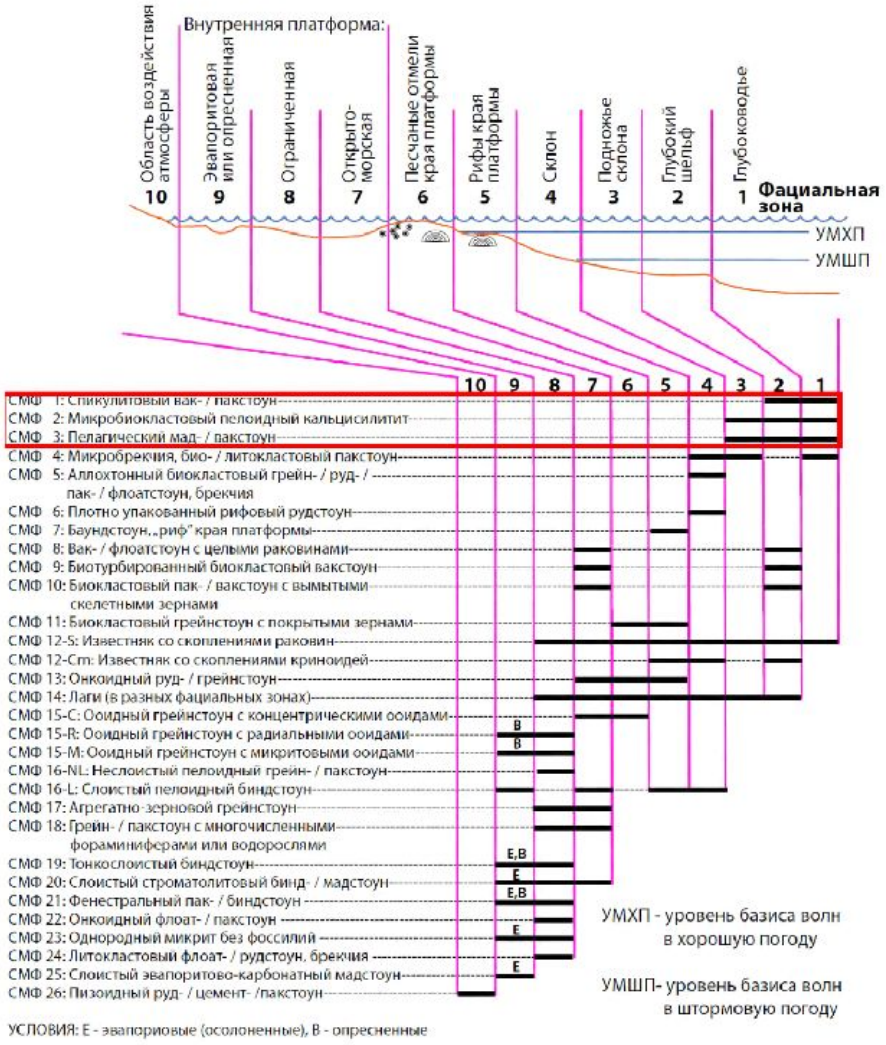
Структуры карбонатных построек



Фациальные модели: окаймленные платформы (1)

- Мелководная плоская платформа, склон и глубоководный бассейн
- Платформа может быть огражденной рифом
- Узкие фациальные пояса

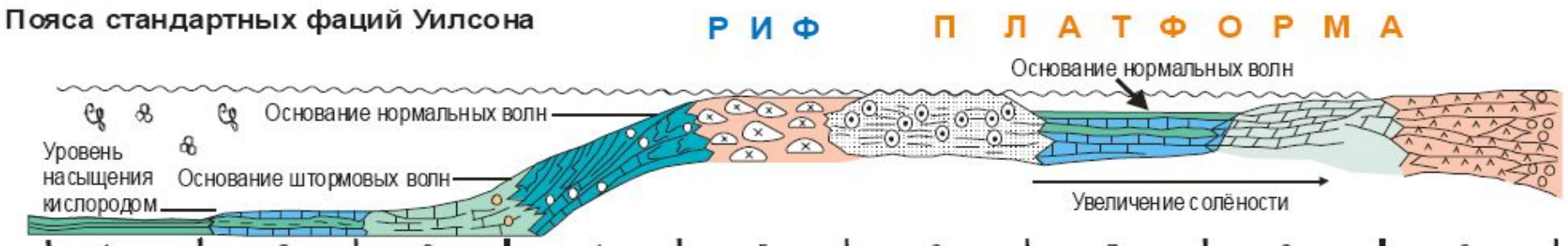
Стандартные микрофации окаймленной платформы



СМФ окаймленной платформы

(Fluegel, 2010)

Фациальный профиль карбонатной платформы



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Общая обстановка и фации	Бассейн (застойный или эвапоритовый) а) тонкий обломочный материал б)карбонаты в)эвапориты	Неритовая,открытого моря а)карбонаты б)сланцы	Карбонаты подошвы склона	Склон а)слоистые тонкозернистые осадки со следами оползания б) участки детритового и известкового песчаника в)массы известкового ила	Органические постройки (рифы) а)бафстоны б)инкрустирующие массы в)бафстоны	Пески края платформы а)намывные известковые пески б)островные дюнные пески	Открытая платформа а)тела известковых песков б)участки вакстонов и аргиллитов,биогермы в)участки терригенных осадков	Замкнутая платформа а)биокластические вакстоны,лагуны и заливы б)лито-био-кластические пески в приливно-отливных каналах в)известковые илы на приливно-отливных равнинах г)тонкозернистые терригенные кластические прослои	Платформенные эвапориты а)желваковые ангидриты и доломиты на засолонённой равнине б)тонкослоистые эвапориты в высыхающих прудах
Литология	Тёмные сланцы или алевролиты, тонкие известняки (застойный бассейн).Эвапориты Заполняют бассейн если происходит высыхание	Известняки с обильными ископаемыми и прослоями кремня	Тонкозернистые карбонаты, местами окремнелые	Различная в зависимости от турбулентности воды на склоне, осадочные брекчии и известковистые песчаники	Массивные известняки и доломиты	Калькаренит-оолитовые известковые пески или доломиты	Различные карбонатные и терригенные породы	Часто доломиты и доломитовые известняки	Неправильн слоистые доломиты и ангидриды, местами переходящие в красноцветны породы
Цвет	Тёмно-коричневый, чёрный и красный	Серый,зелёный,красный, коричневый	От тёмного до светлого	От тёмного до светлого	Светлый	Светлый	От тёмного до светлого	Светлый	Красный,жёлтый коричневый
Тип зёрен и осадочная текстура	Известковые аргиллиты и тонкие кальцисилтиты	Вакстоны биокластические и из целых раковин, иногда кальцисилтиты	Преимущественно тонкиеаргиллиты иногда с кальцисилтитами	Известковые алевролитовые и биокластические вакстоны,пакстоны, литокласты	Баундстоны и карманы грейнстонов и пакстонов	Грейнстоны, хорошо сортированные и окатанные	Различные структуры в грейнстонах и аргиллитах. Биотурбация	Сгустковые пеллетовые аргиллиты и грейнстоны, полосчатые аргиллиты, более крупнозернистые вакстона в каналах	
Напластование и осадочная текстура	Очень тонкая слоистость(мм). Ритмичная слоистость,иногда косая слоистость ряби	Биотурбированные, тонко- и среднеслоистые с желваковыми слоями	Незначительная ламинация. Часты массивные линзы сортированных осадков. Литокласты и экзотические глыбы.	Следы оползания, участками слоистые, склоновые постройки, экзотические глыбы	Массивные органические структуры и открытый каркас с пустотами. Инъекционные дайки. Иногда страматаксис	Средняя и крупная косая слоистость	Интенсивная биотрубация	Пятна, тонкая строматолитовая слоистость,доломитовые корки. Косослоистые пески в каналах	Ангидрит по гипсу, желваковые розетки, пластинчатость, неправильная слоистость,каличе
Терригенные обломочные компоненты	Кварцевый алеврит и глинисты сланцы	Кварцевый алеврит и глинисты сланцы	Небольшое количество сланцев, алеврита и тонкозернистых песчаников	Небольшое количество сланцев и алеврита	Отсутсвуют	Местами кварцевый песок	Терригенные и карбонатные хорошо сегрегированные слои	Возможно переслаивание теригенных крбонатных слоёв	Эолиниты и терригенные прослои могут иметь существенные значения
Биота	Тонкий планктон и нектон, иногда отложения массовой гибели	Разнообразная раковинная фауна, следы жизнедеятелности, инофауна и эпифауна	Биокластический детрит в основном с верхней части склона	Колонии целых ископаемых и биокластический детрит	Крупные каркасные колониальные постройки и связанные с ними сообщества	Немного эндемичных организмов.Специализированное сообществом. Сильно абрадированные обломки раковин и других частей платформы	Преобладают наиболее толерантные группы (двустворчатые: гастроподы, гкбки, фораминиферы, водросли) Менее толерантные группы (цефалоподы, брахиоподы и иглокожие) часто угнетённые	Бедная фауна В основном гастроподы, соскаблива тели,водросли, некоторые фораминиферы (милиолиды) и остракоды	Практически одни строматолиты

Фациальные модели: изолированные платформы (2)

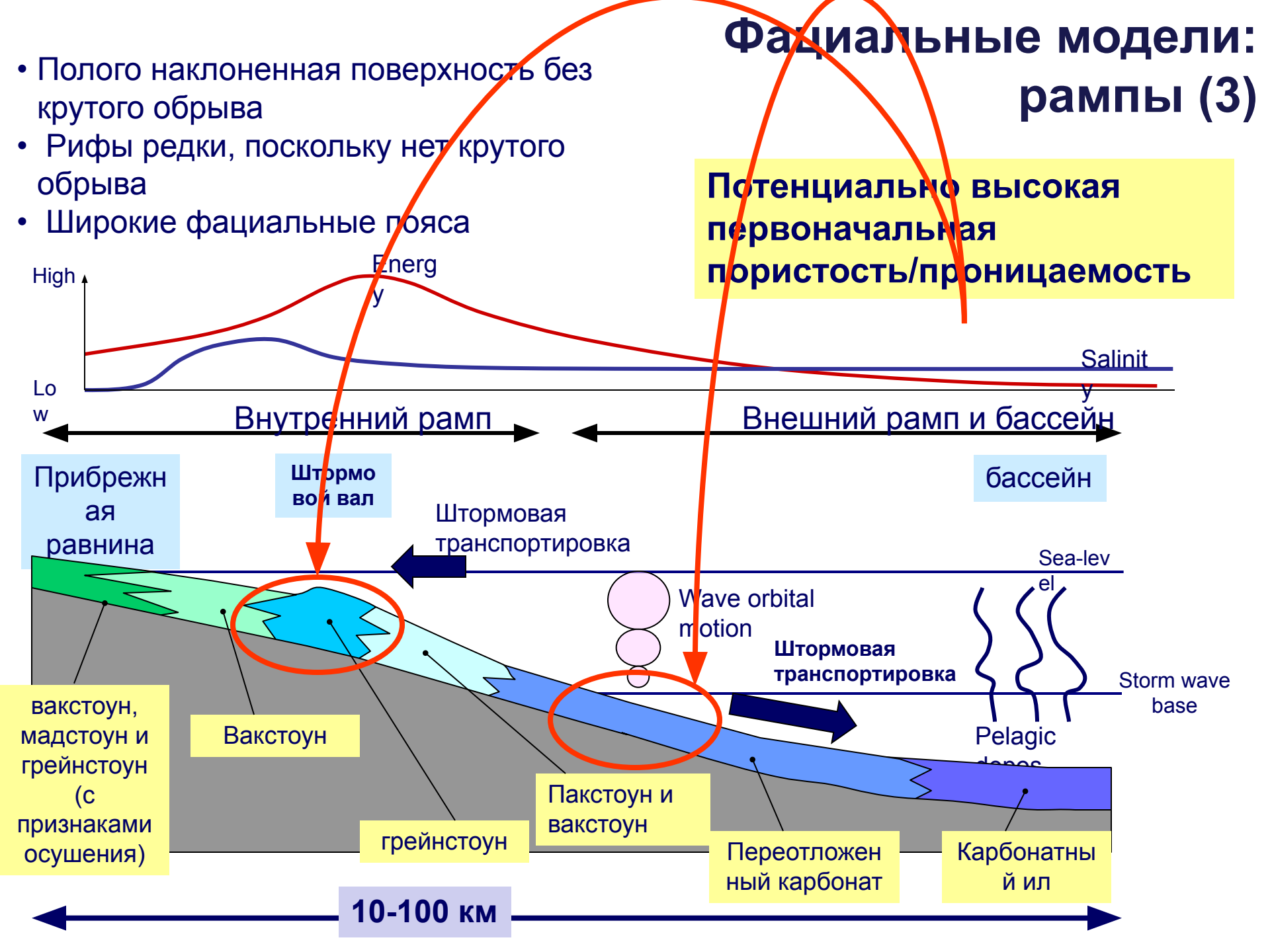
Потенциально высокая первоначальная пористость/проницаемость

- Мелководная плоская платформенная область, обрамленная со всех сторон склонами и глубоководным бассейном
- Платформа обрамлена рифами
- Узкие фациальные пояса (исключая внутреннюю платформу)
- Защищена от кластического материала

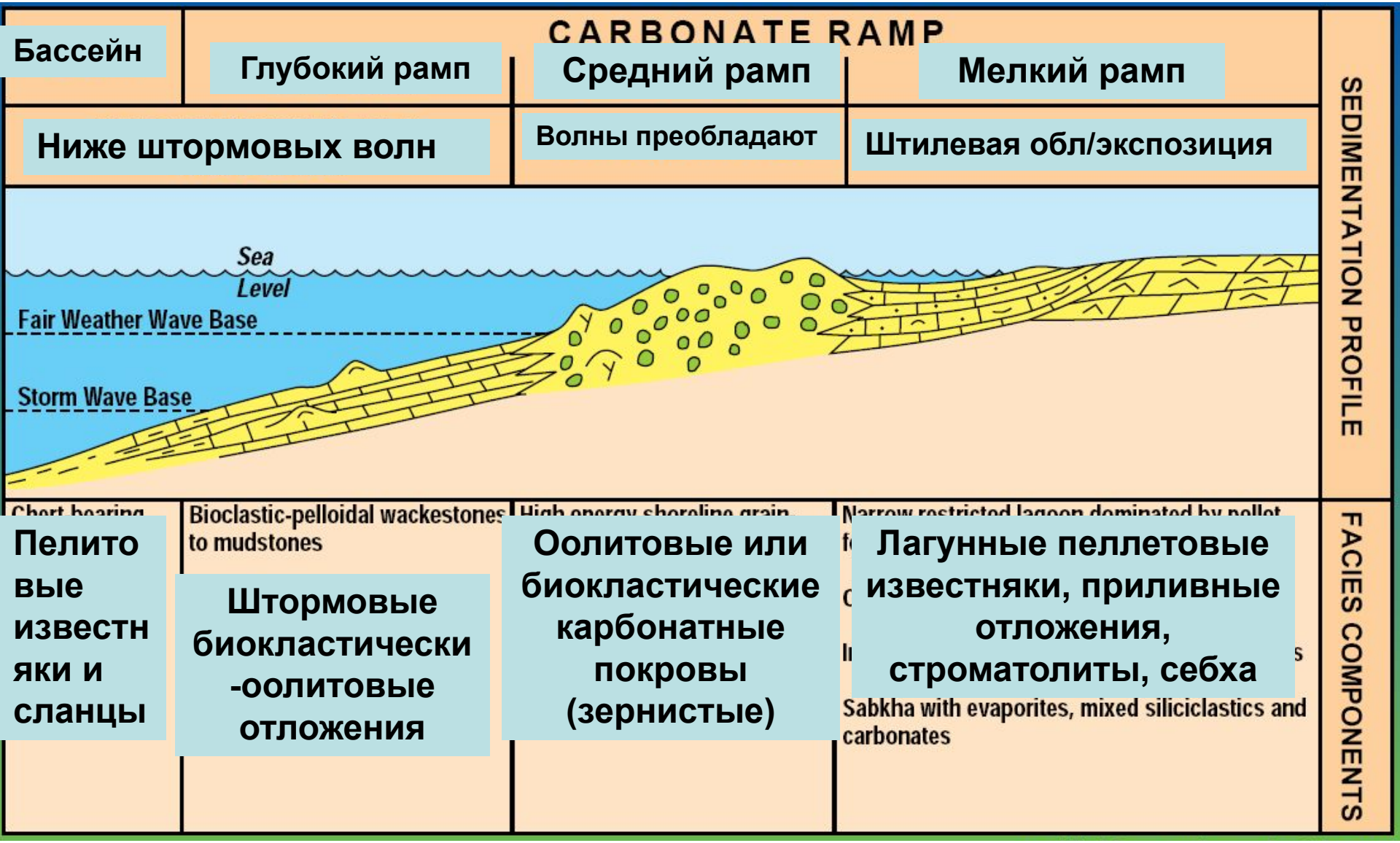
Фациальные модели: рампы (3)

- Полого наклоненная поверхность без крутого обрыва
- Рифы редки, поскольку нет крутого обрыва
- Широкие фациальные пояса

Потенциально высокая первоначальная пористость/проницаемость

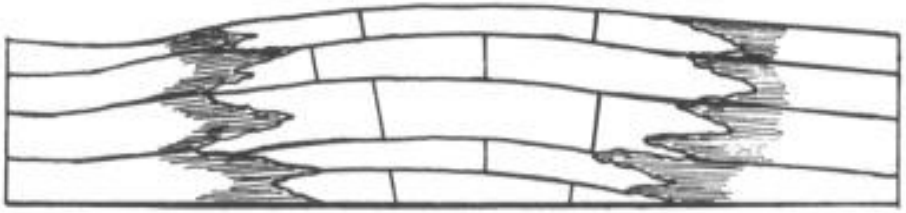


Фациальные зоны карбонатного рампа



Стандартные микрофации карбонатного рампа

Второстепенные карбонатные массивы и карбонатные постройки



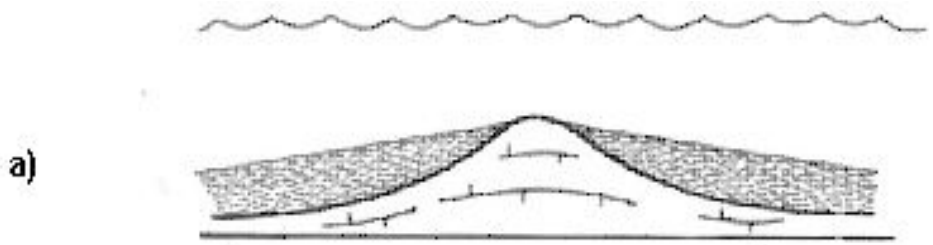
Карбонатный массив (биогерм+биостром)

Карбонатные постройки (биостромы, биогермы)

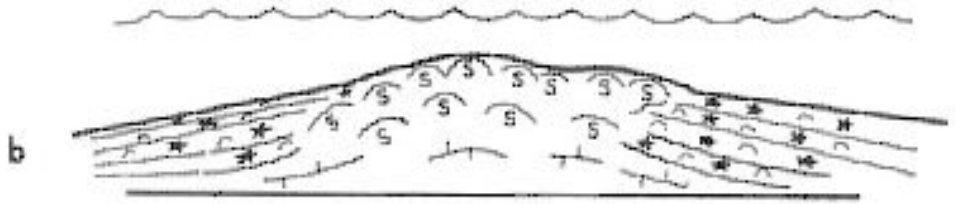
Постройка – общий термин для латерально ограниченного тела карбонатных осадков с топографическим рельефом.

Карбонатный массив (биогерм+биостром) - это локальное карбонатное тело со слабо-выраженным рельефом

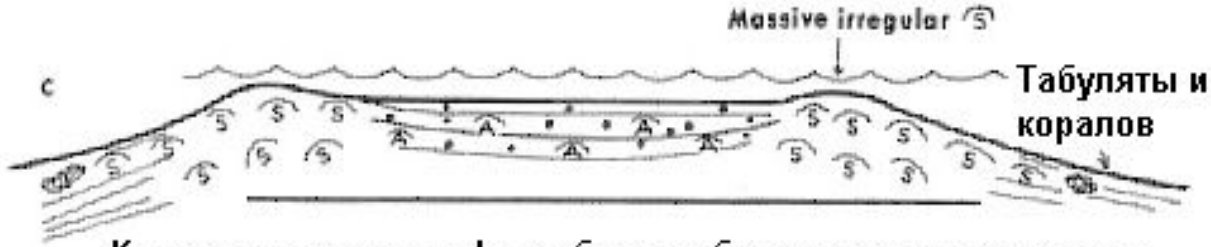
Общие типы шельфовых построек (по Уилсону)



Илистые купола с мшанками и / или водорослями и губками. Обычно симметричные, окружены сланцами.



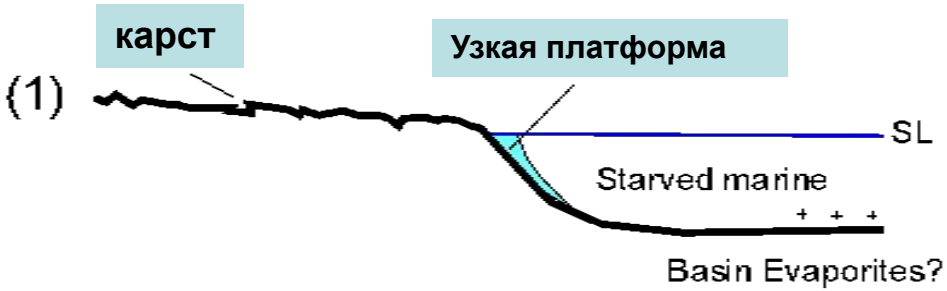
Изолированная гнездовая рифовая форма с строматопоидной покрышкой; на фланге пласты с обломками криноидей. Могут иметь вытянутую форму



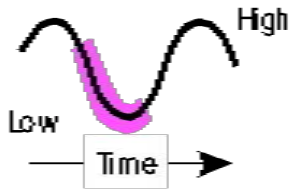
Крупные низкорельефные банки, обрамленные строматопоидами. Размер может варьировать от гигантского (сотни км) до атоллов 1-2 км в диаметре.

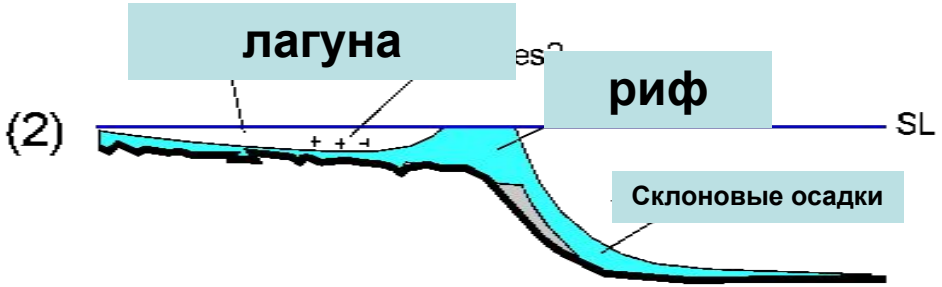
Развитие карбонатных систем осадконакопления

Развитие карбонатного осадконакопления в зависимости от положения уровня моря

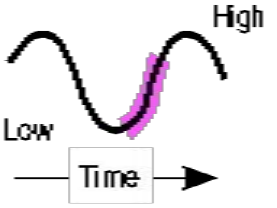


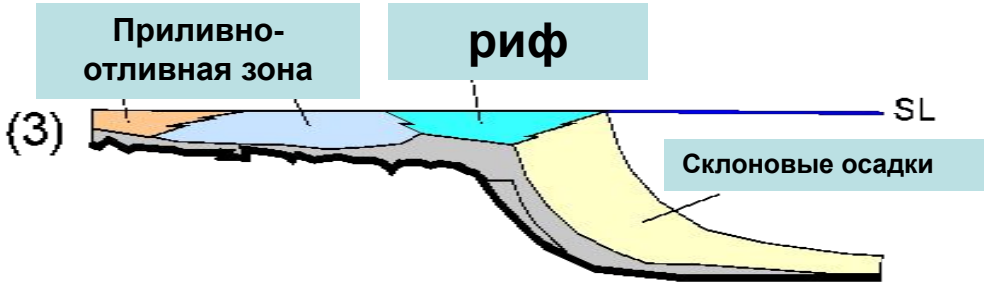
Низкое стояние



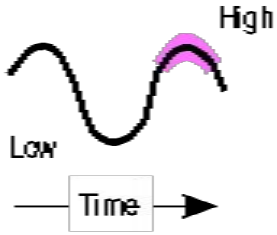


Начало подъема

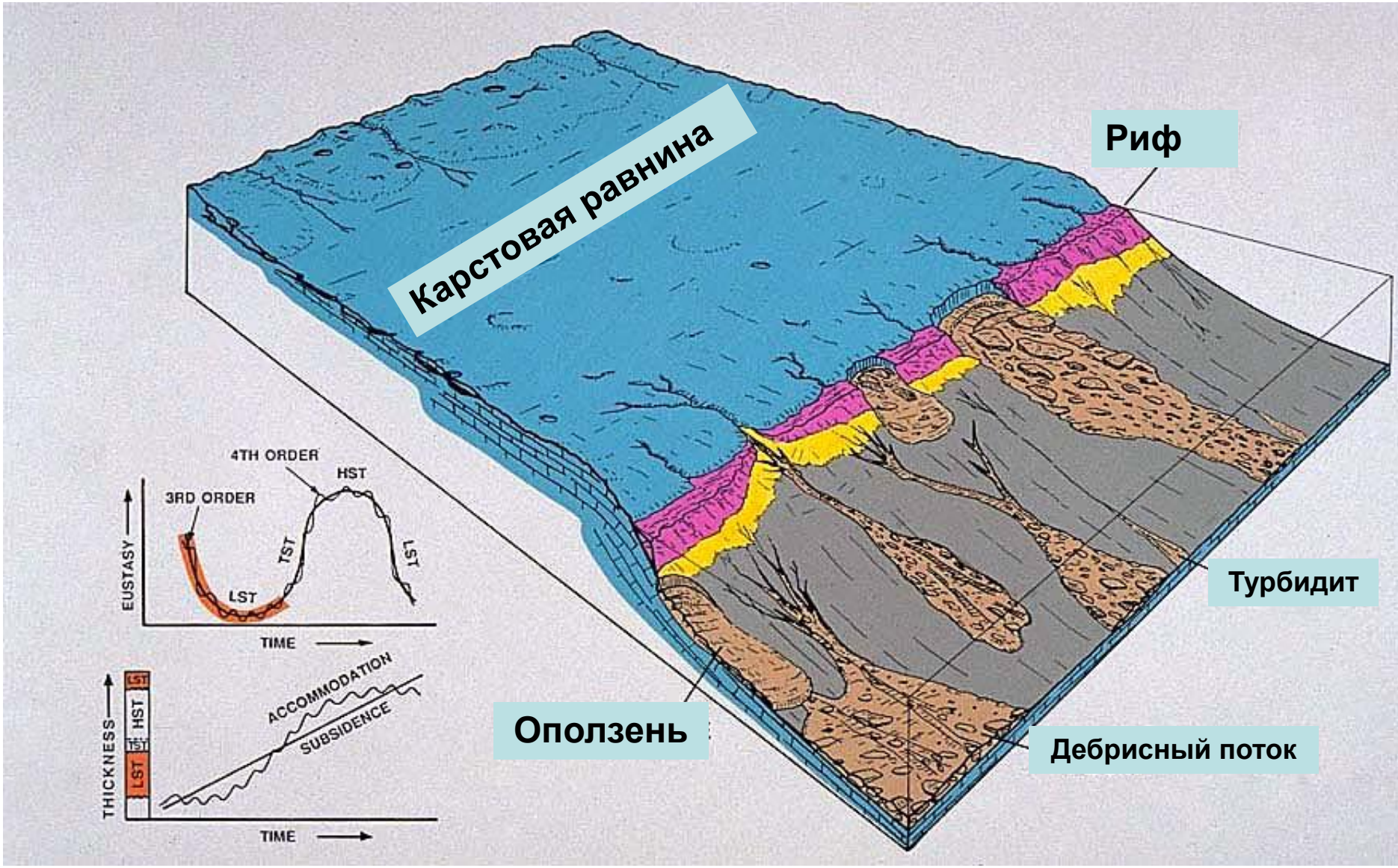




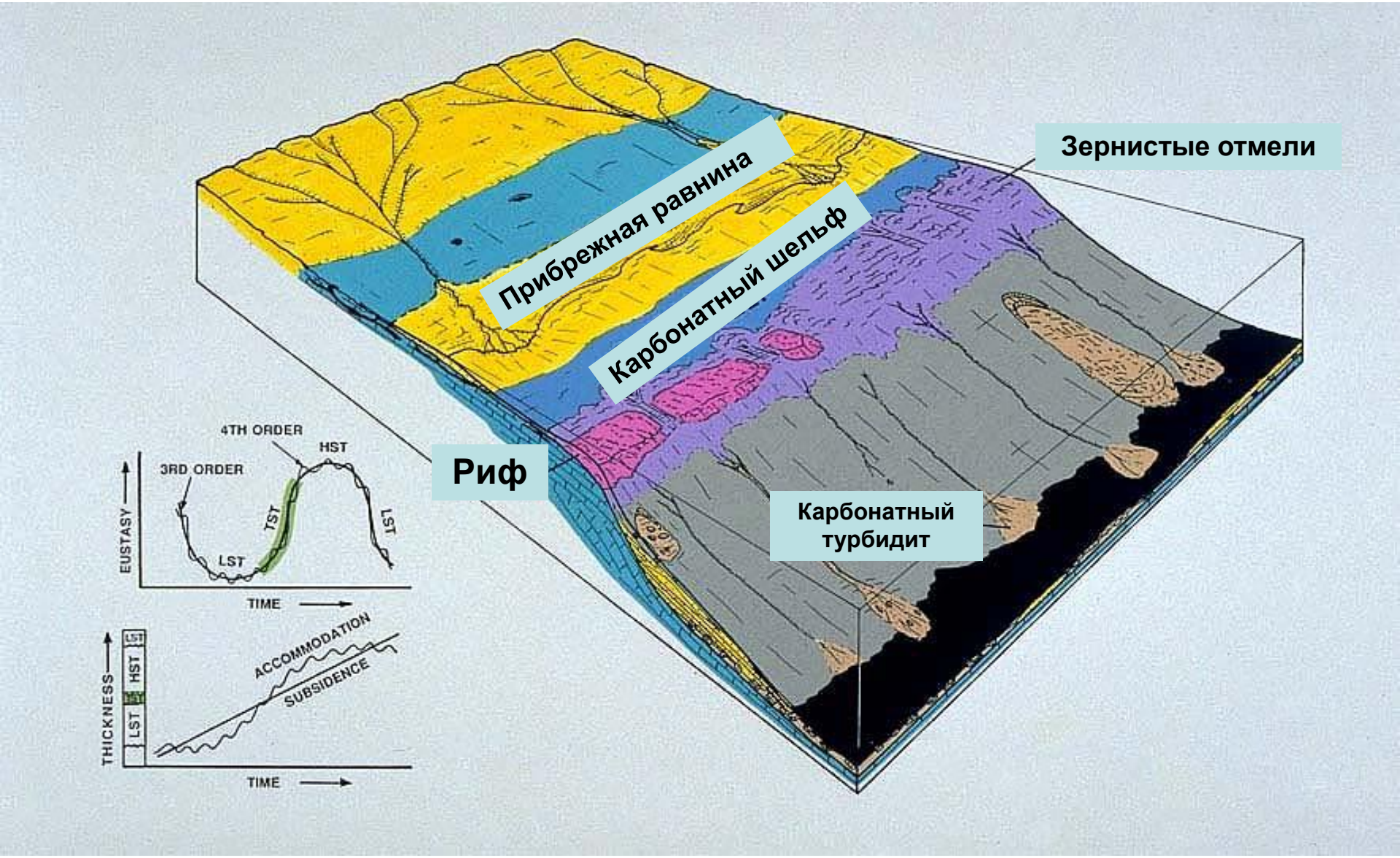
Высокое стояние



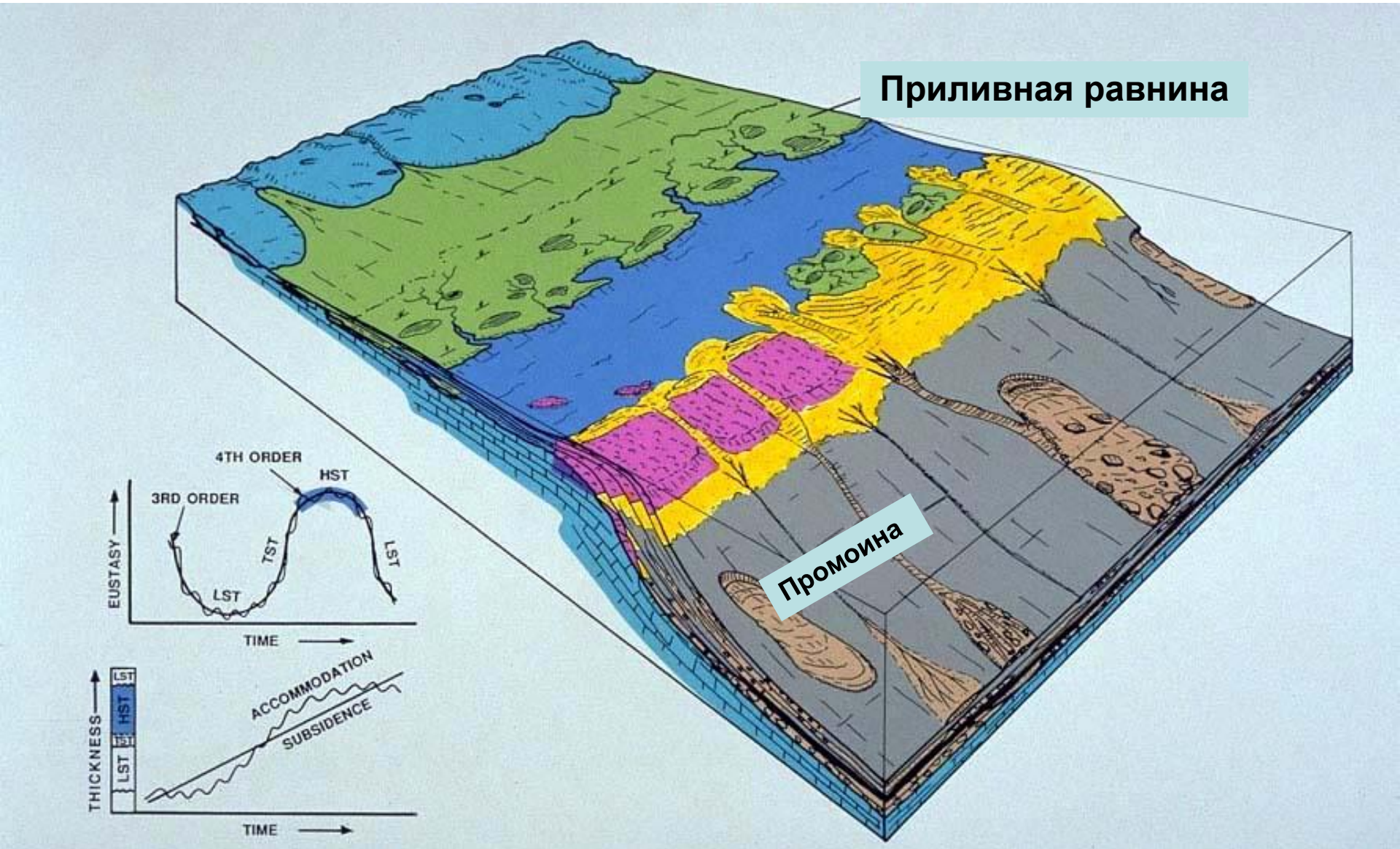
Обстановки тракта низкого стояния

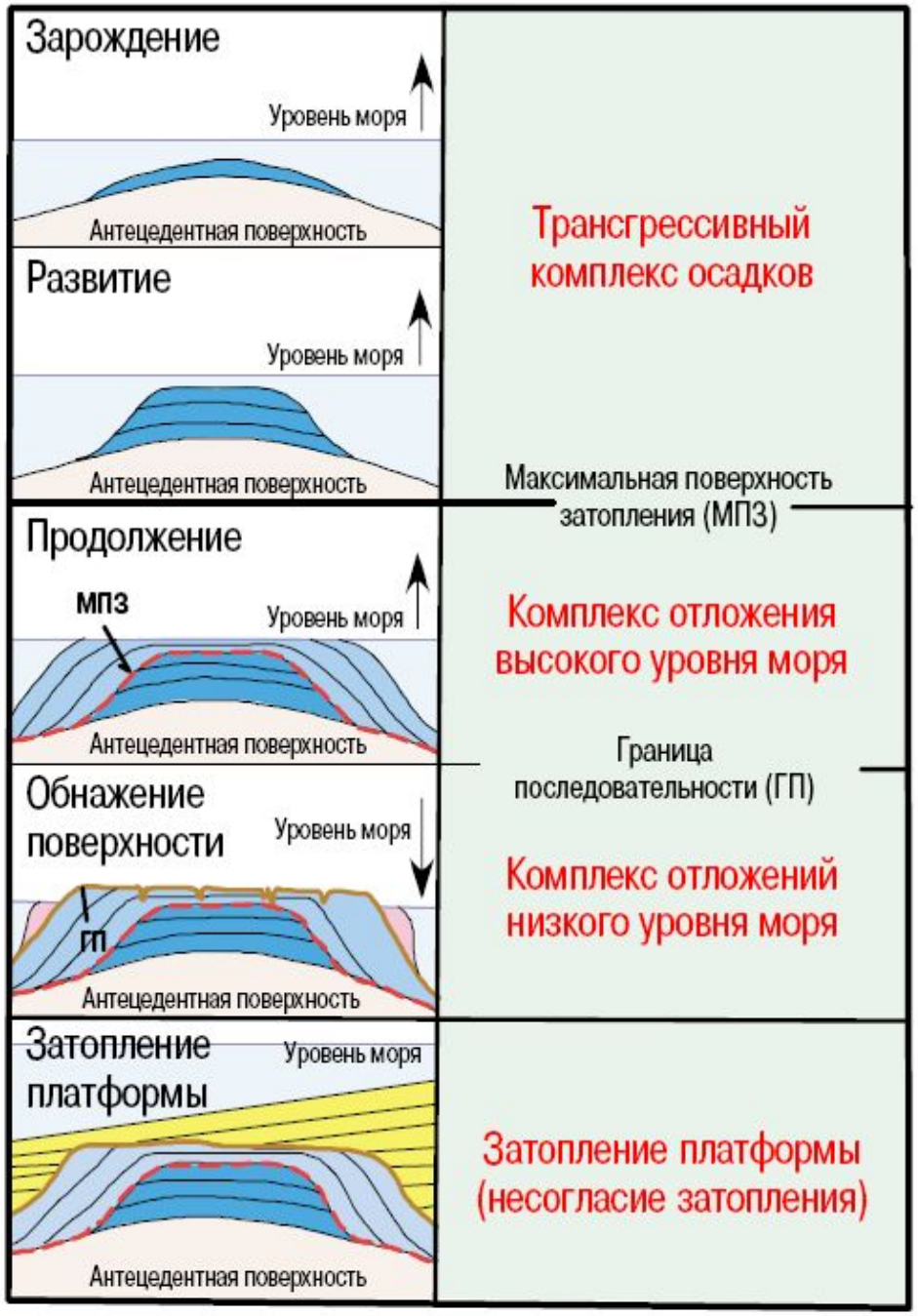


Обстановки трансгрессивного тракта



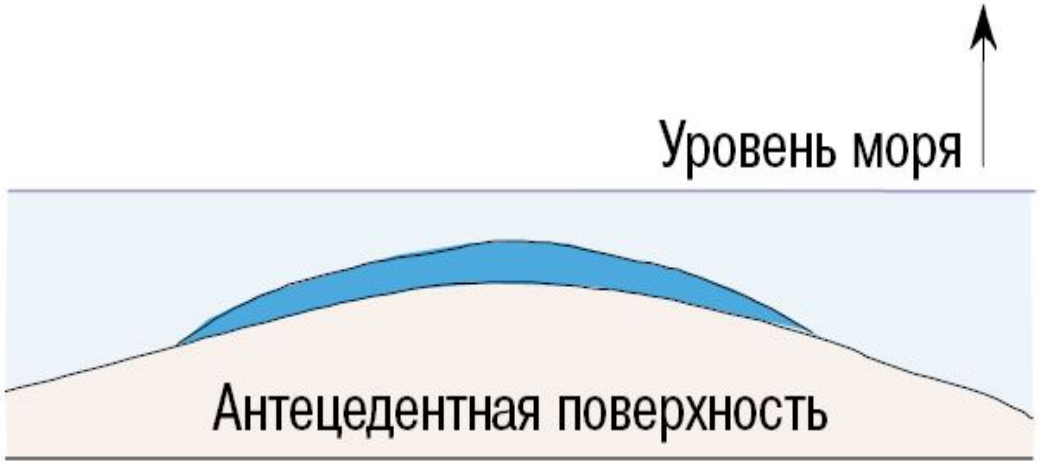
Обстановки тракта высокого стояния





Модель изолированной карбонатной платформы

Модель изолированной карбонатной платформы (1)

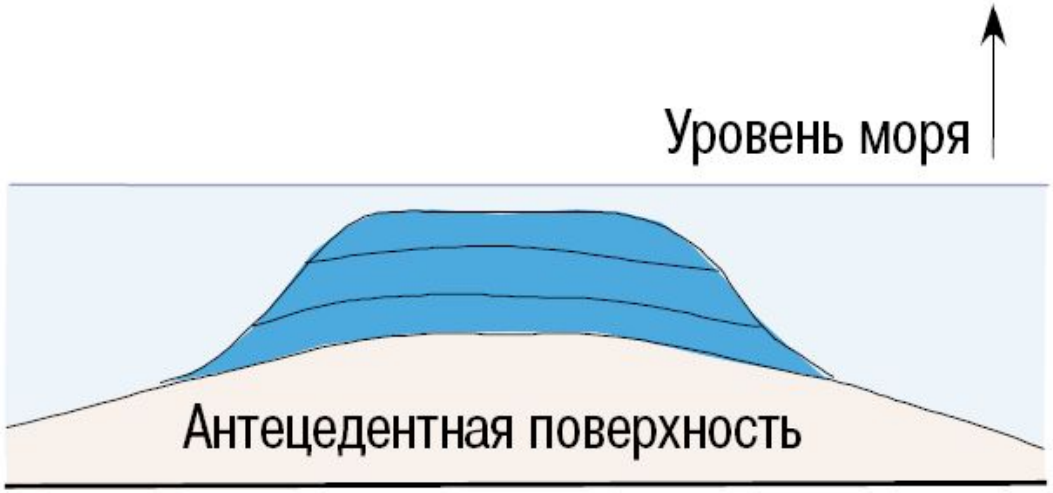


Зарождение

Высокий первоначальный уровень моря

Начало карбонатного осадконакопления

Модель изолированной карбонатной платформы (2)

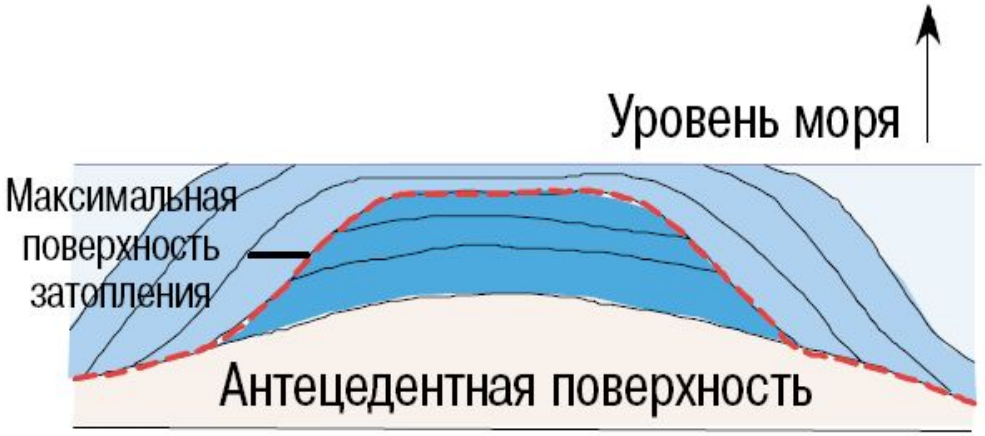


Развитие

Растущему уровню моря сопутствует карбонатное осадконакопление

Возникают аккумулятивные границы

Модель изолированной карбонатной платформы(3)

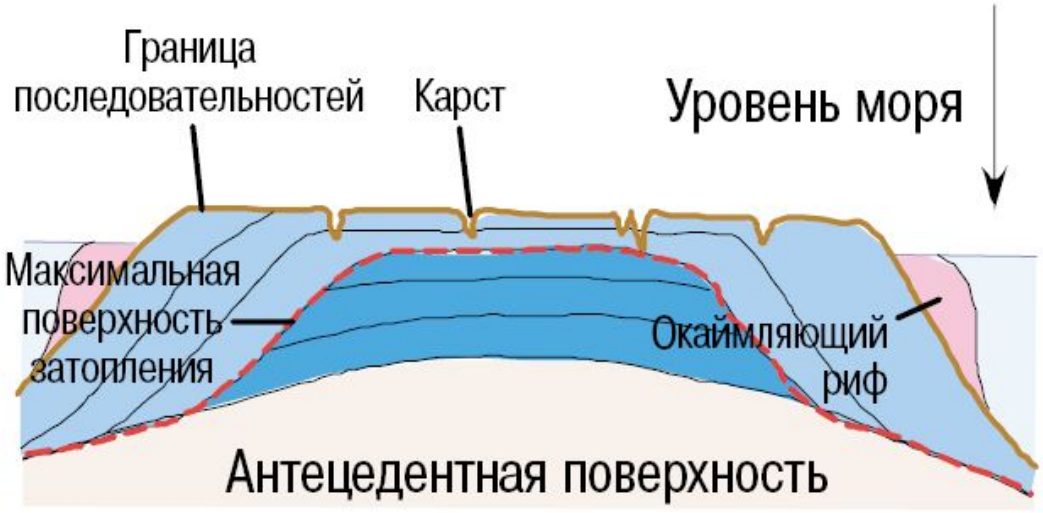


Продолжение развития

Скорость карбонатонакопления превышает скорость появления аккумулятивного пространства

Карбонаты выходят за пределы кровли платформы на склоны и дно бассейна

Модель изолированной карбонатной платформы (4)

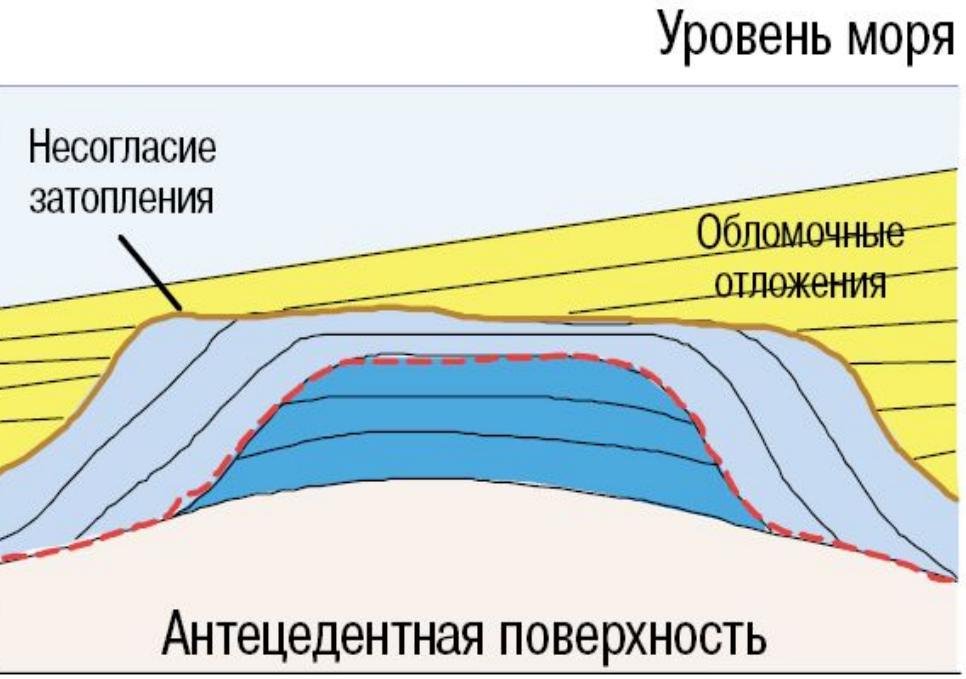


Обнажение поверхности

Карбонатонакопление на месте ограничено небольшими окаймляющими рифами

Поверхность платформы подвергается карстованию в условиях гумидного климата

Модель изолированной карбонатной платформы (5)



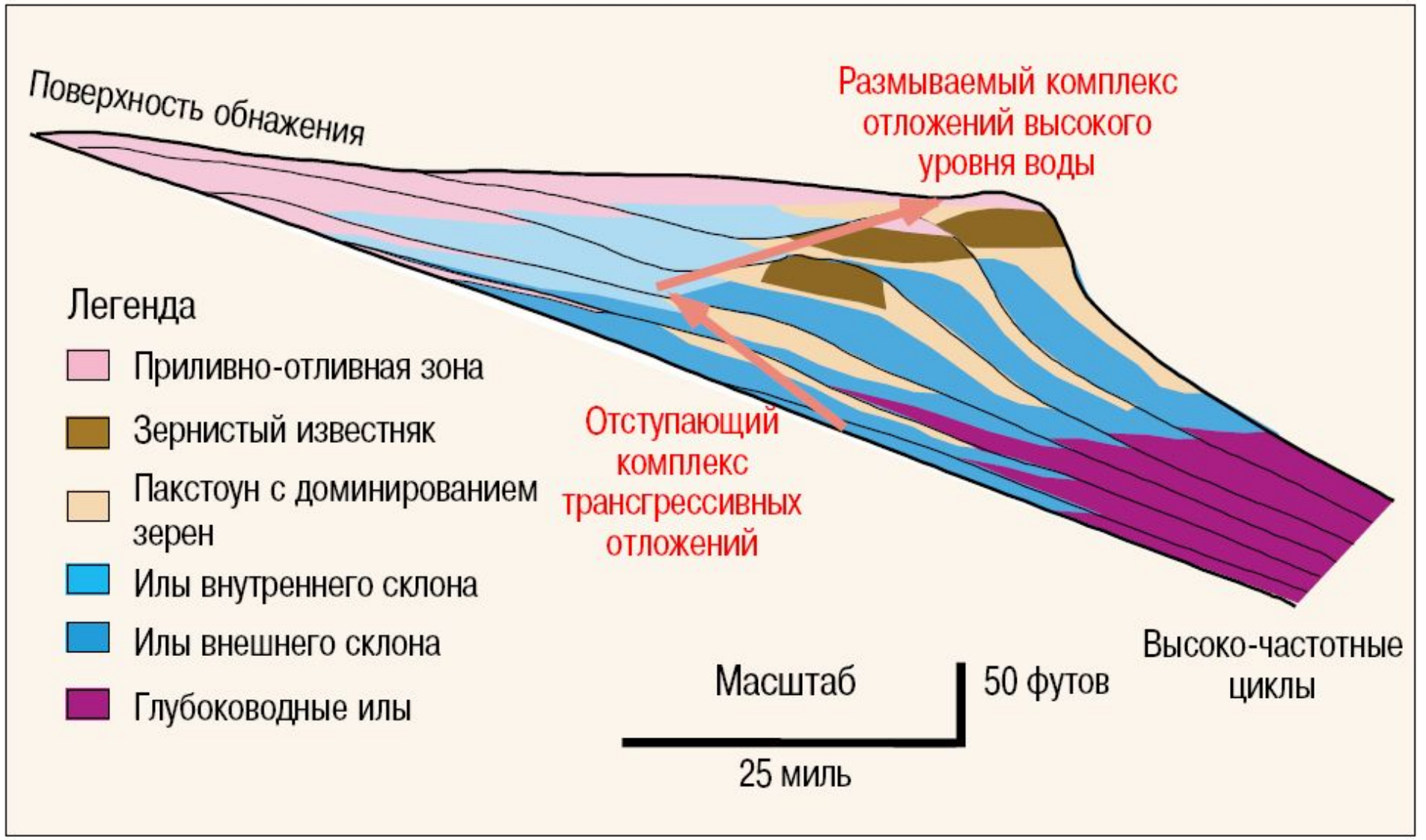
Затопление платформы

Ухудшение качества окружающей среды может привести к прекращению осадконакопления и погружению

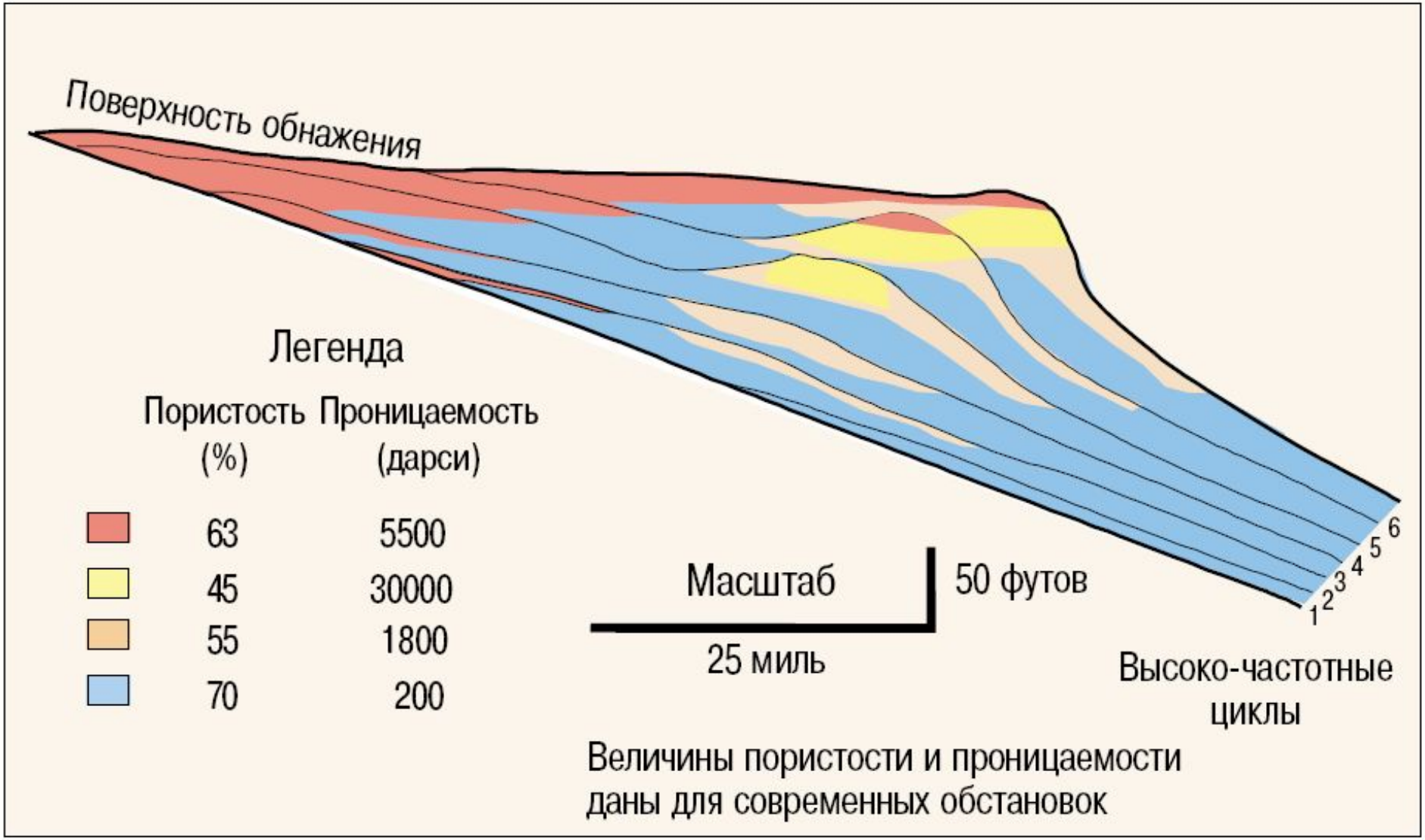
Затопленная платформа может быть трансгрессивно перекрыто проградирующими глубоководными кремнеобломочными осадками

Связь промысловых характеристик с обстановками карбонатонакопления и литотипами пород

Цикличность карбонатного рампа



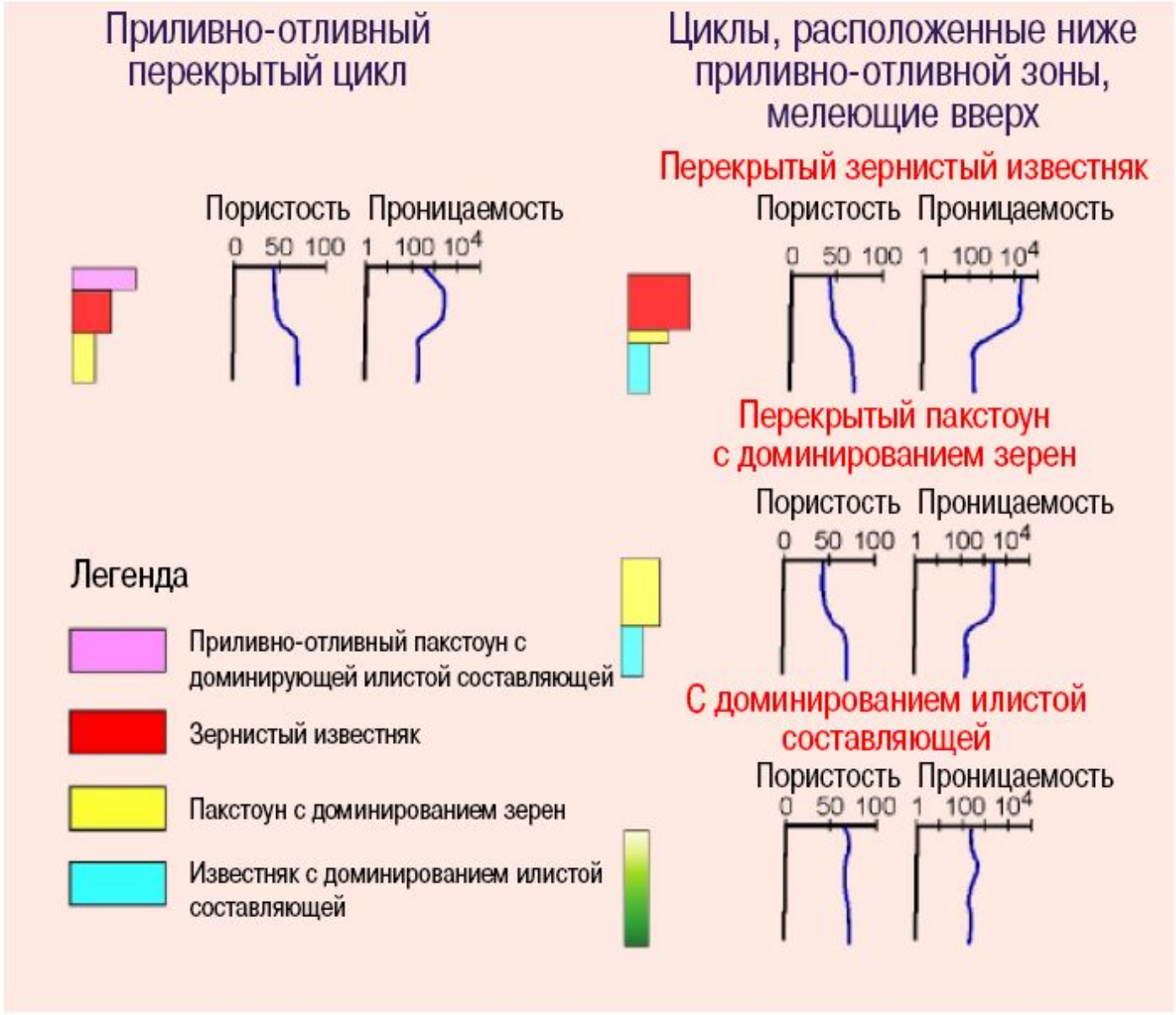
Распределение первичной пористости и проницаемости



- Наибольшие величины проницаемости наблюдаются на перегибе склона (желтый) и в приливно-отливной зоне (красный)

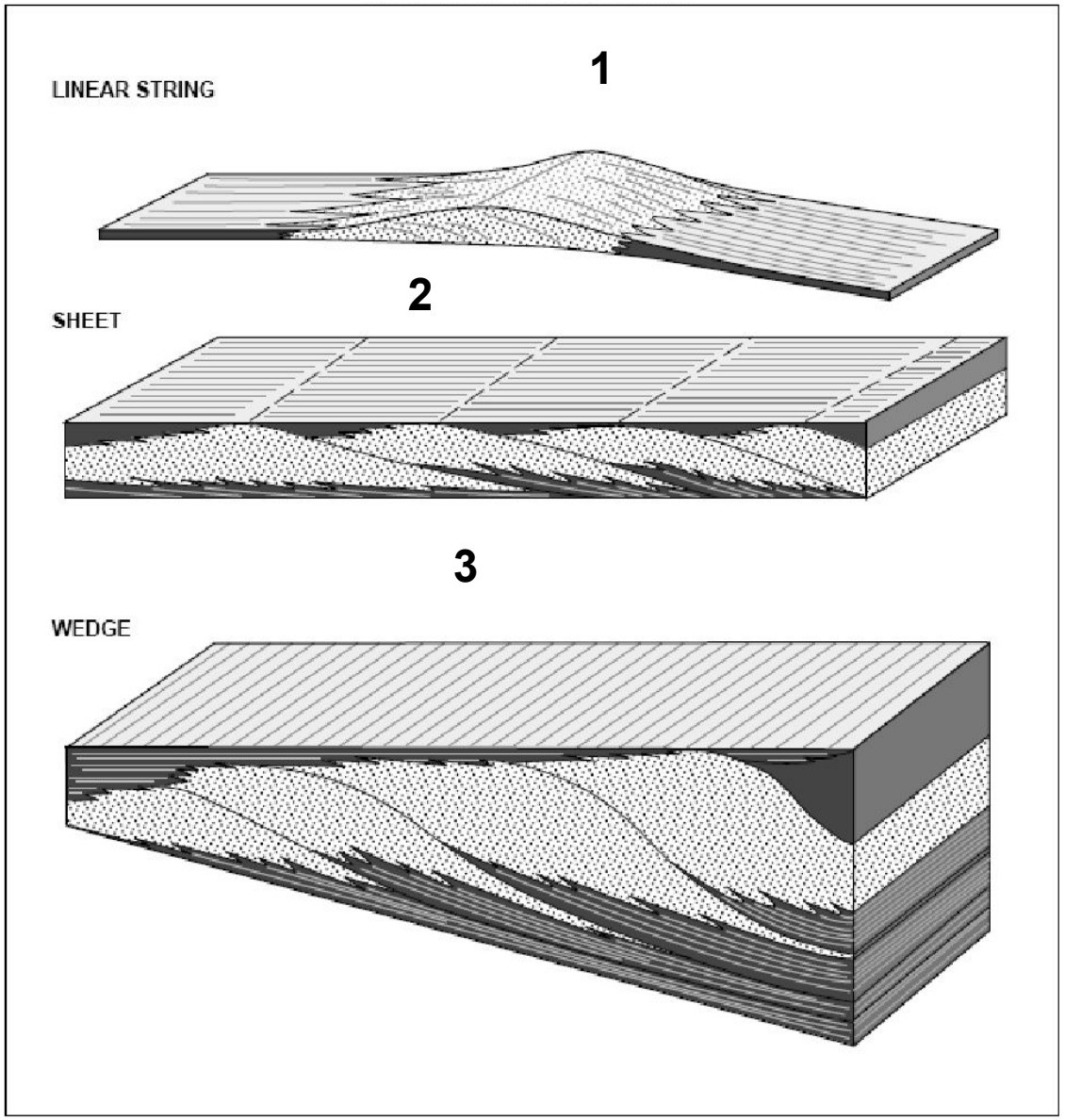
(Luci

Высокочастотные циклы с обмелением вверх



Пористость и проницаемость коррелируют с осадочной структурой

Форма карбонатного коллектора мелководного рампа

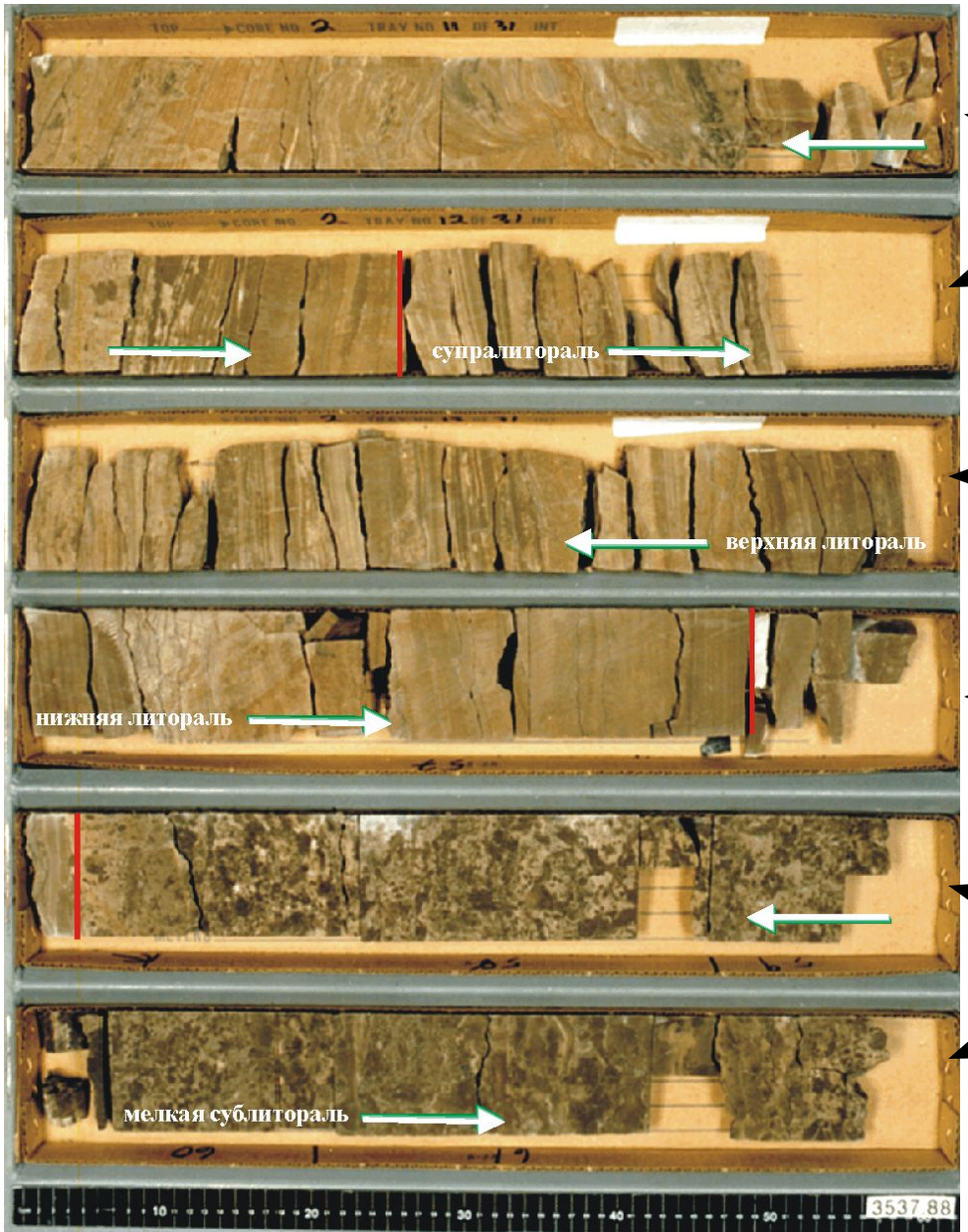


1. Линейная форма характерна для отдельной карбонатной песчаной отмели.
2. Покровная форма образуется при проградации мелководного комплекса в условиях пониженного аккомодационного пространства.
3. Клиноформа образуется при проградации в условиях погружения или большого аккомодационного пространства.

Диаграмма пористость-проницаемость для различных карбонатных литотипов

Пример оценки коллекторских свойств карбонатных пород и построения седиментационной модели

Шаг первый: полевое описание керна и выделение текстурно-структурных (фациальных) неоднородностей



Супралитораль

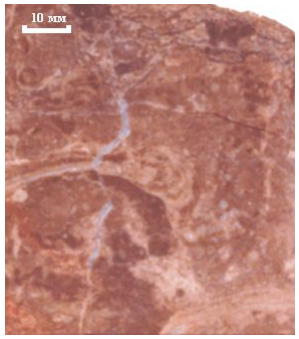
Верхняя литораль

Нижняя литораль

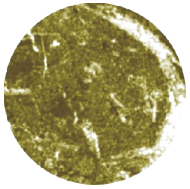
Мелкая сублитораль

Шаг второй: микроскопия с выделением литотипов, слагающих фации

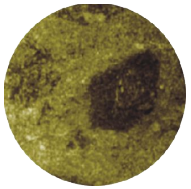
ГЛУБОКОЙ СУБЛИТОРАЛИ (скв. 3565 - Верхний Возей, гл.3514,9м)



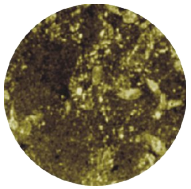
12x



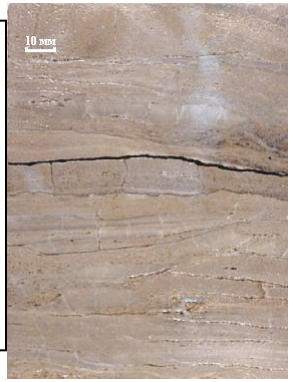
МЕЛКОЙ СУБЛИТОРАЛИ (скв. 3565 - Верхний Возей, гл.3551,25м)



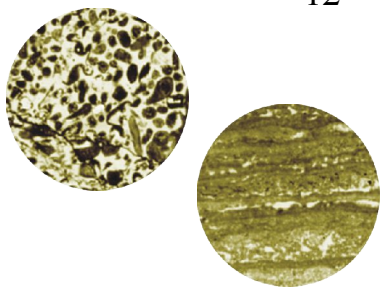
НИЖНЕЙ ЛИТОРАЛИ (скв. 3578 - Верхний Возей, гл.3549,7м)



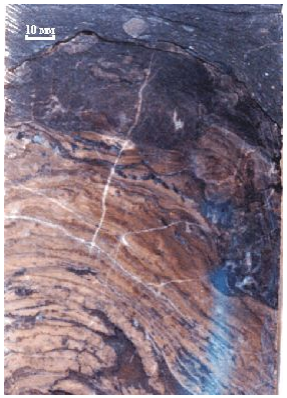
ВЕРХНЕЙ ЛИТОРАЛИ (скв. 3475 - Верхний Возей, гл.3413,35м)

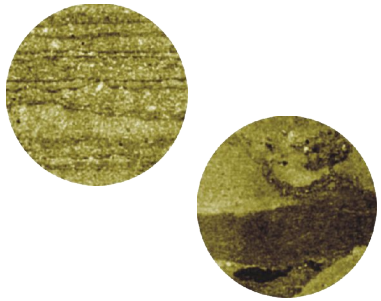


12x



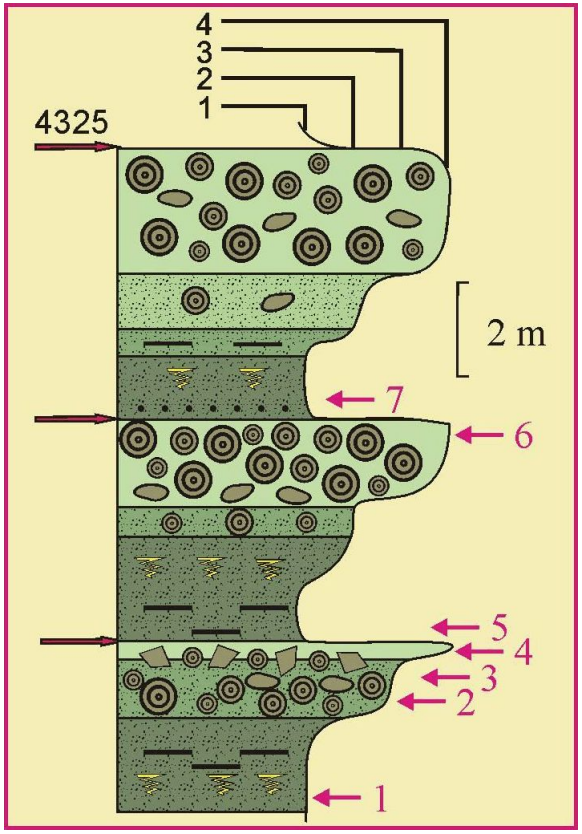
СУПРАЛИТОРАЛИ (скв. 3578 - Верхний Возей, гл.3563,4м)



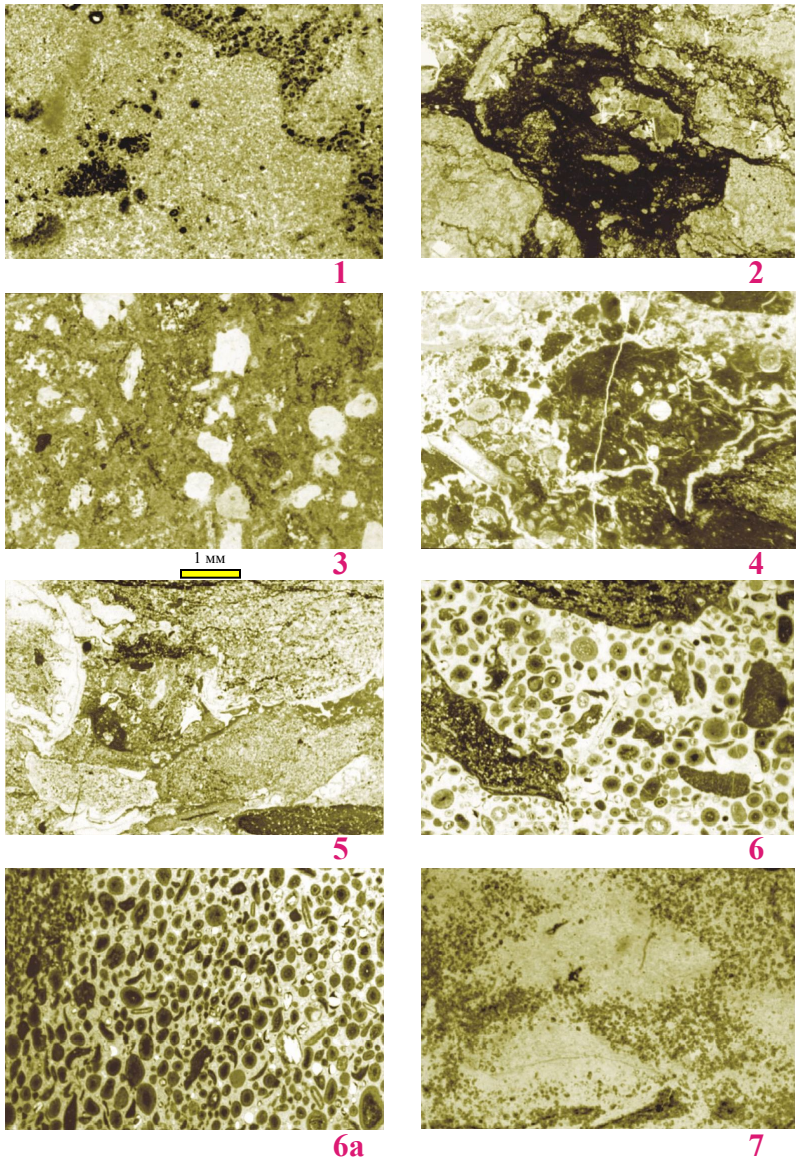


СУБАЭРАЛЬНОЙ ЗОНЫ (скв. 3565 - Верхний Возей, гл.3524,9м)

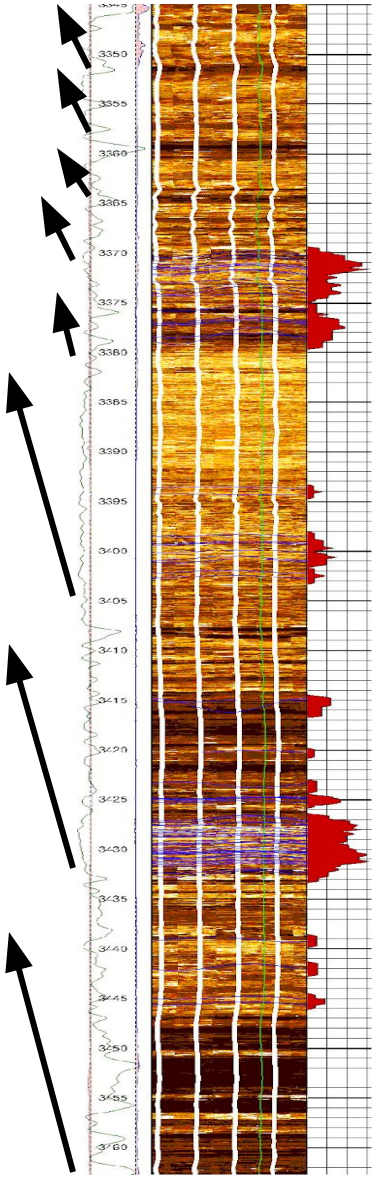
Шаг третий: циклический анализ и стратификация разреза



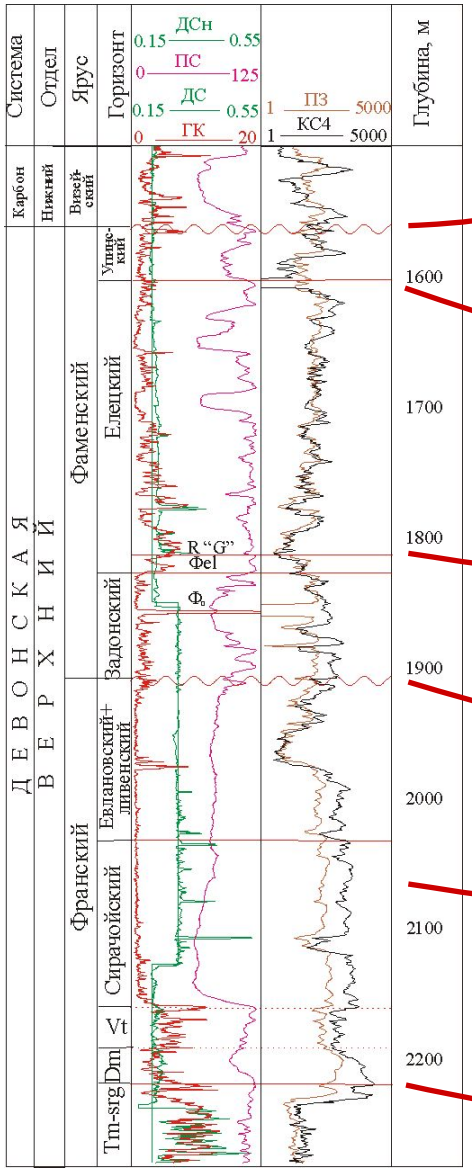
Границы парасеквенций; Литокласты;
Окатанные биокласты; Пелоиды;
Оолиты;
Известняки: 2-иловые, 3-зернисто-иловые,
4-илово-зернистые,
5-зернистые (лито- и биокластовые)
Биотурбированные известняки
Места отбора шлифов

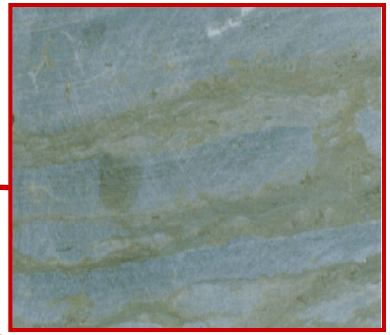


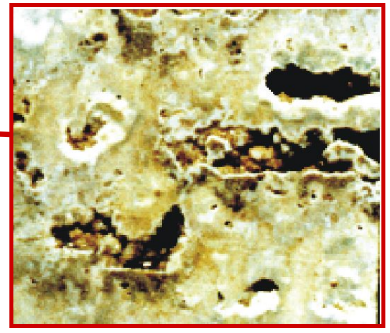
Выделение разноранговых седиментационных циклитов по FMI



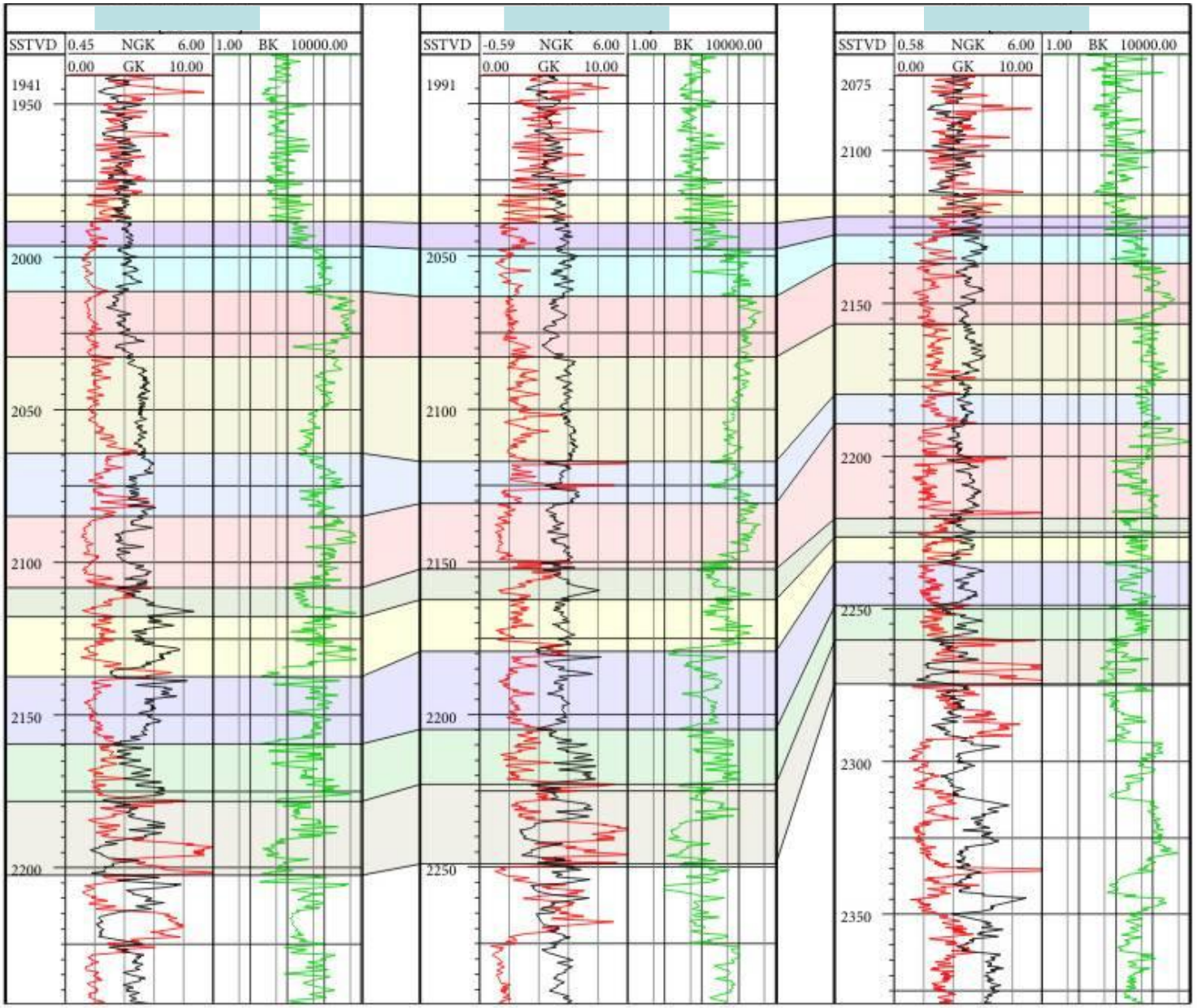
Шаг четвертый: корреляция литотипов с данными ГИС



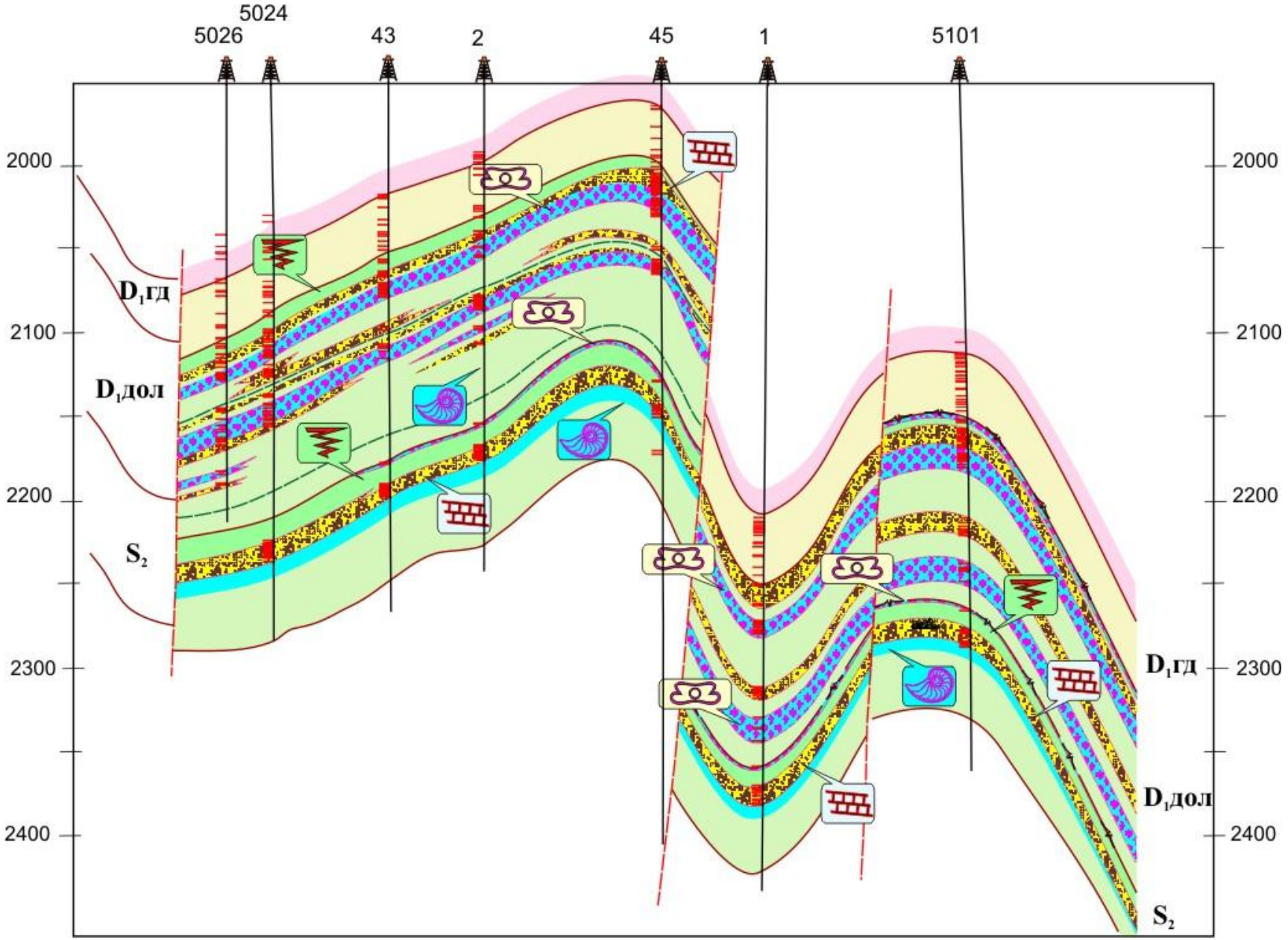




Шаг пятый: попластовая 2D корреляция и построение профилей

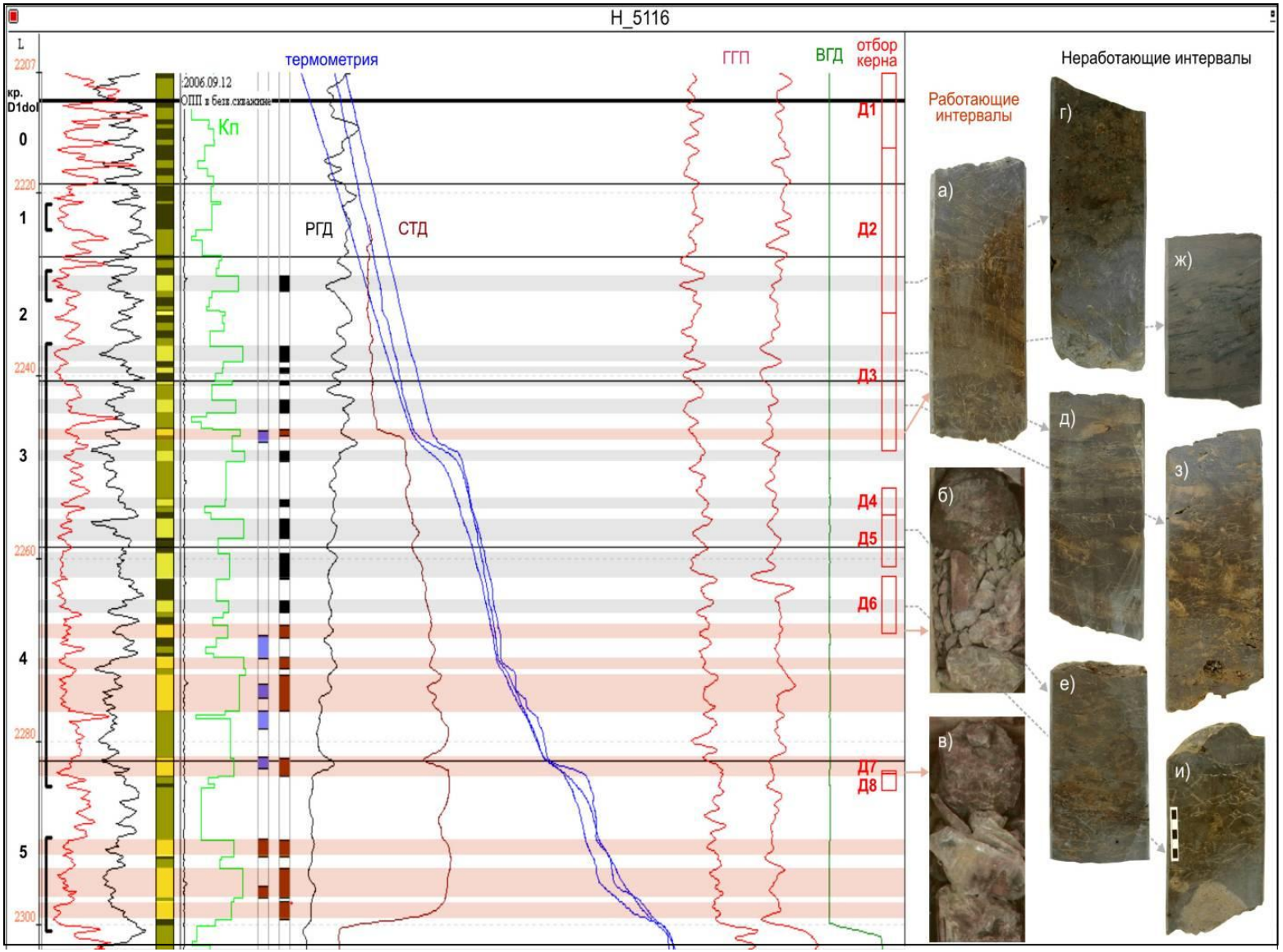


Шаг шестой: выделение коллекторов различного типа в разрезе



Шаг седьмой: сопоставление промыслово-геофизических исследований и данных керна

Зависимость приточности интервалов от генезиса пород коллекторов



***Шаг восьмой*:**

Оценка степени преобразования пород и связи с обстановкой осадконакопления:

1. ***Первичный (неизмененный) коллектор***
2. ***Коллектор, частично утративший первичные свойства (частично измененный)***
3. ***Вторичный коллектор (полностью измененный)***

1. Первичный (неизмененный) коллектор

- Свойства коллектора и единицы потока контролируются и объясняются: 1) осадочными структурами; 2) осадочными фациями; 3) осадочными циклитами (последовательностями)
- Зернистые карбонаты маркируют высокоэнергетичные обстановки и являются хорошими коллекторами
- Илистые карбонаты маркируют низкоэнергетичные обстановки и относятся к плохим коллекторам
- Корреляция пористость/проницаемость (больше пористость, лучше проницаемость)
- Существенно мелководные карбонаты
- Важность осадочных фациальных поясов/палеогеографии (по Уилсону)
- Преимущественно циклическое строение коллектора, единицы потока – протяженные (непрерывные)
- Основные диагенетические процессы: цементация, уплотнение и избирательное выщелачивание

2. Частично измененный коллектор

Важность подводной ***цементации***

- Ключевая роль раннего/метеорного ***диагенеза*** ниже границ циклитов
- Важность ранней диагенетической ***доломитизации***
- Свойства коллектора создавались до захоронения коллектора
- ***Карст*** объясняет вариабельность свойств коллектора
- Слои коллектора/единицы потока еще контролируются колебаниями уровня моря, субаэральной экспозицией
- Основные диагенетические процессы: ***доломитизация и эвапоритовая минерализация*** (гипс, ангидрит)

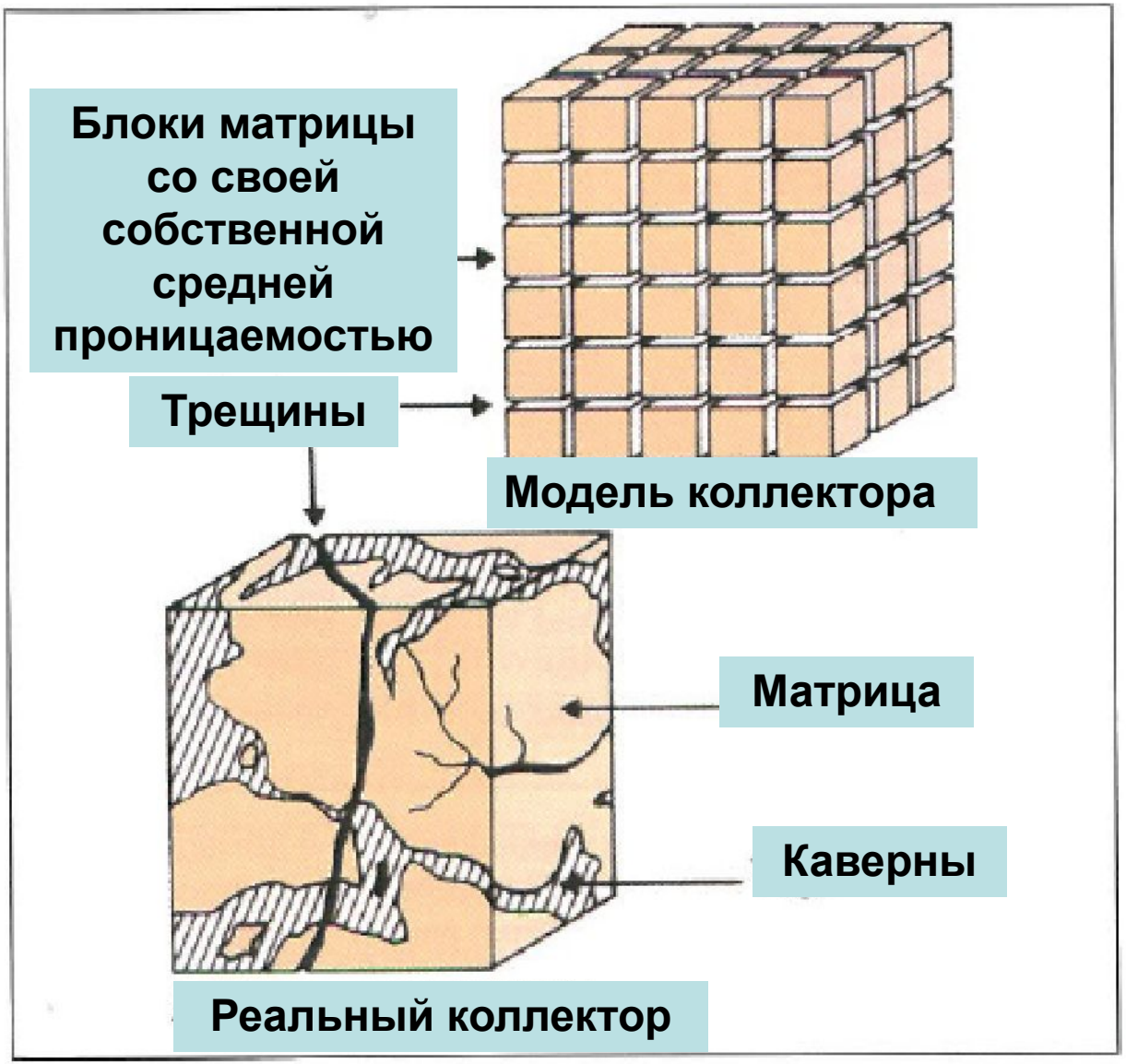
3. Вторичный коллектор

- **Высокий фактор риска – низкий коэффициент успеха**

- Высокогетерогенный коллектор
- Не связанный с осадочными фациями, структурами породы
- Не связанный с границами осадочных циклитов
- Сложная (непредсказуемая) поровая система
- Сложные сейсмические фации
- Непредвиденные диагенетические ловушки

Трещиноватый карбонатный коллектор. Моделировать с учетом соотношения матрицы и трещин (по Нельсону)

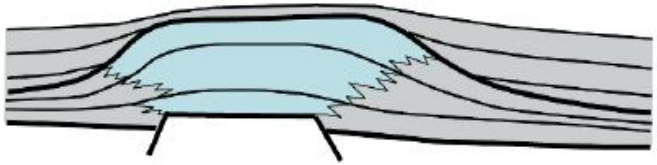
Теоретическая модель коллектора



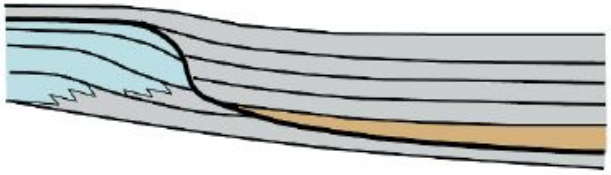
Примеры сейсмического картирования карбонатных построек

Примеры карбонатных построек, картируемых сейсмикой

Изолированная платформа



Край платформы

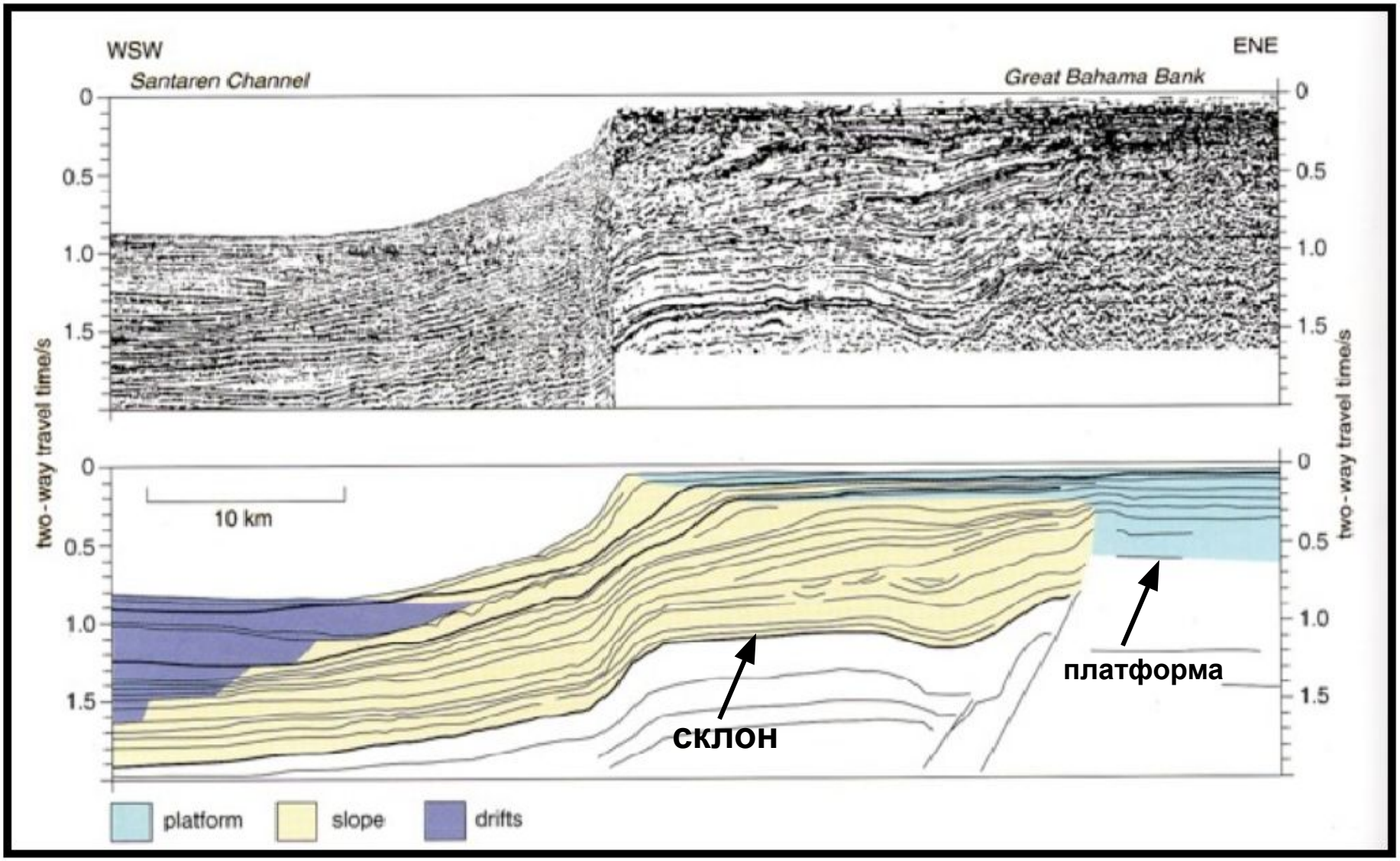


Склоновая постройка

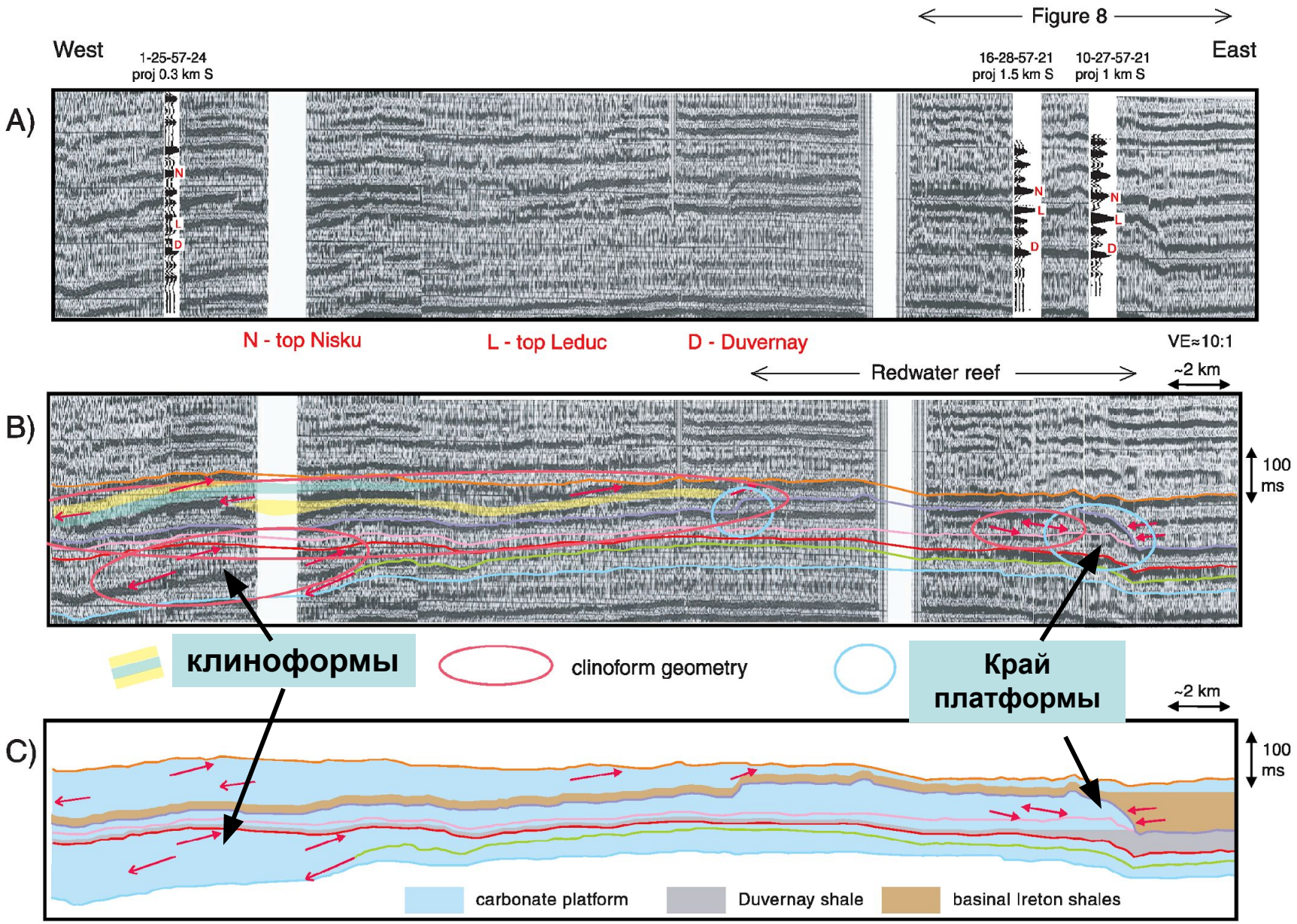
Огражденный шельф

From Handford (1998)

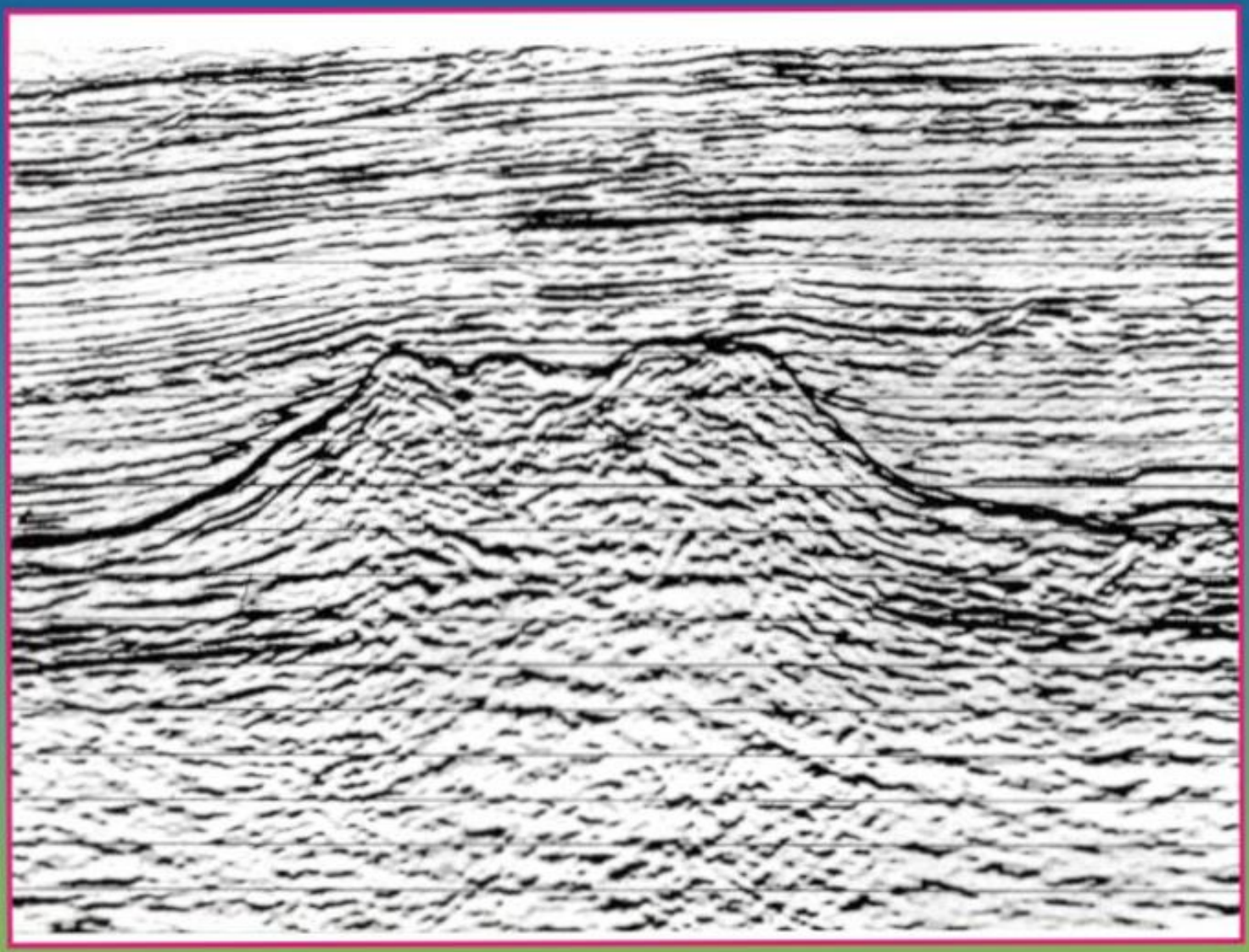
Сейсмический профиль через Большую Багамскую банку, демонстрирующий проградацию границ карбонатного тела



Сейсмический профиль через карбонатную платформу: видны элементы края платформы и проградационного комплекса

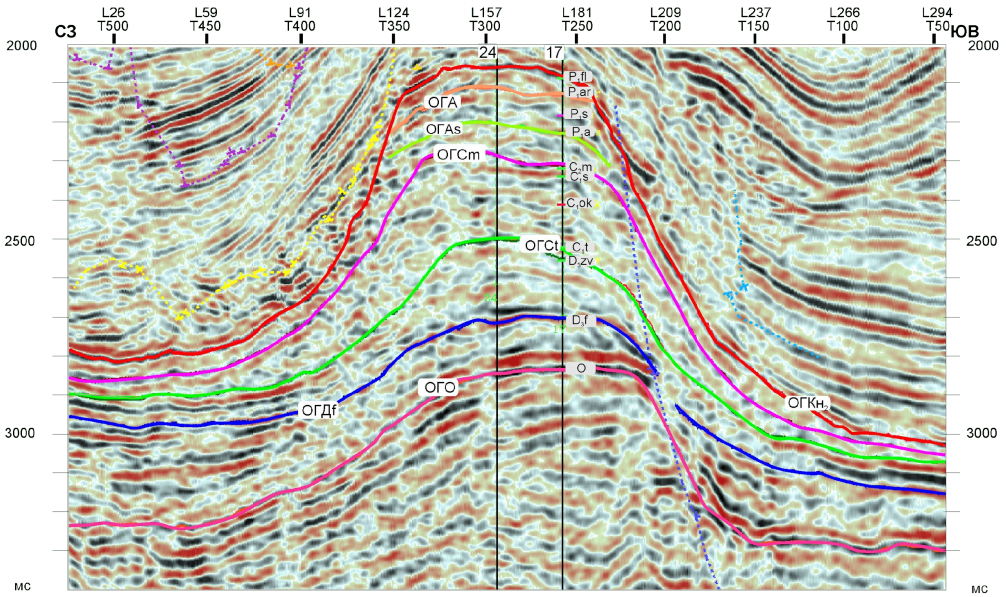


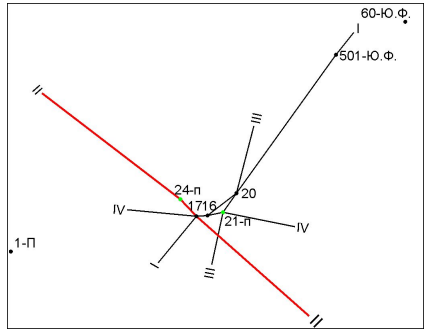
Органогенная постройка в волновом поле

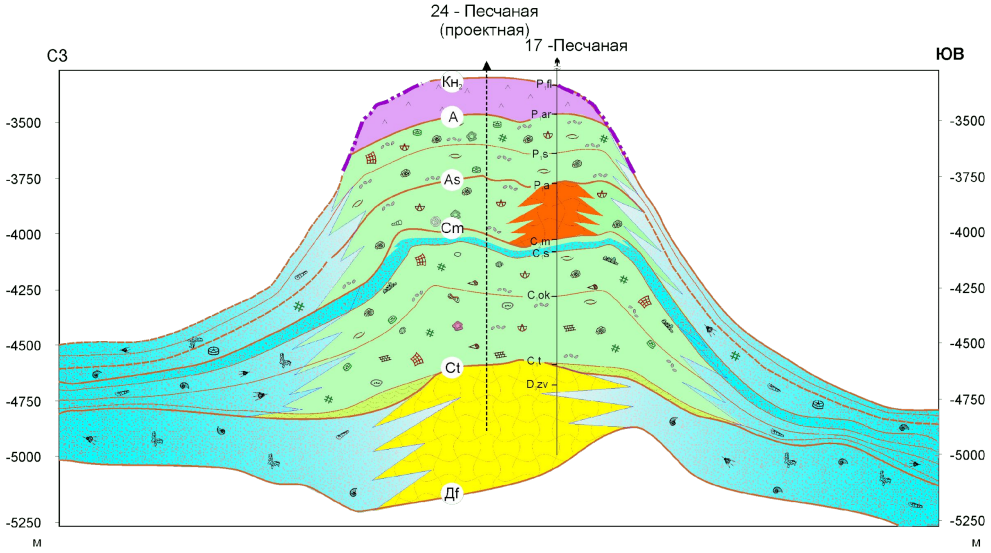


Emery and Myers, 1996

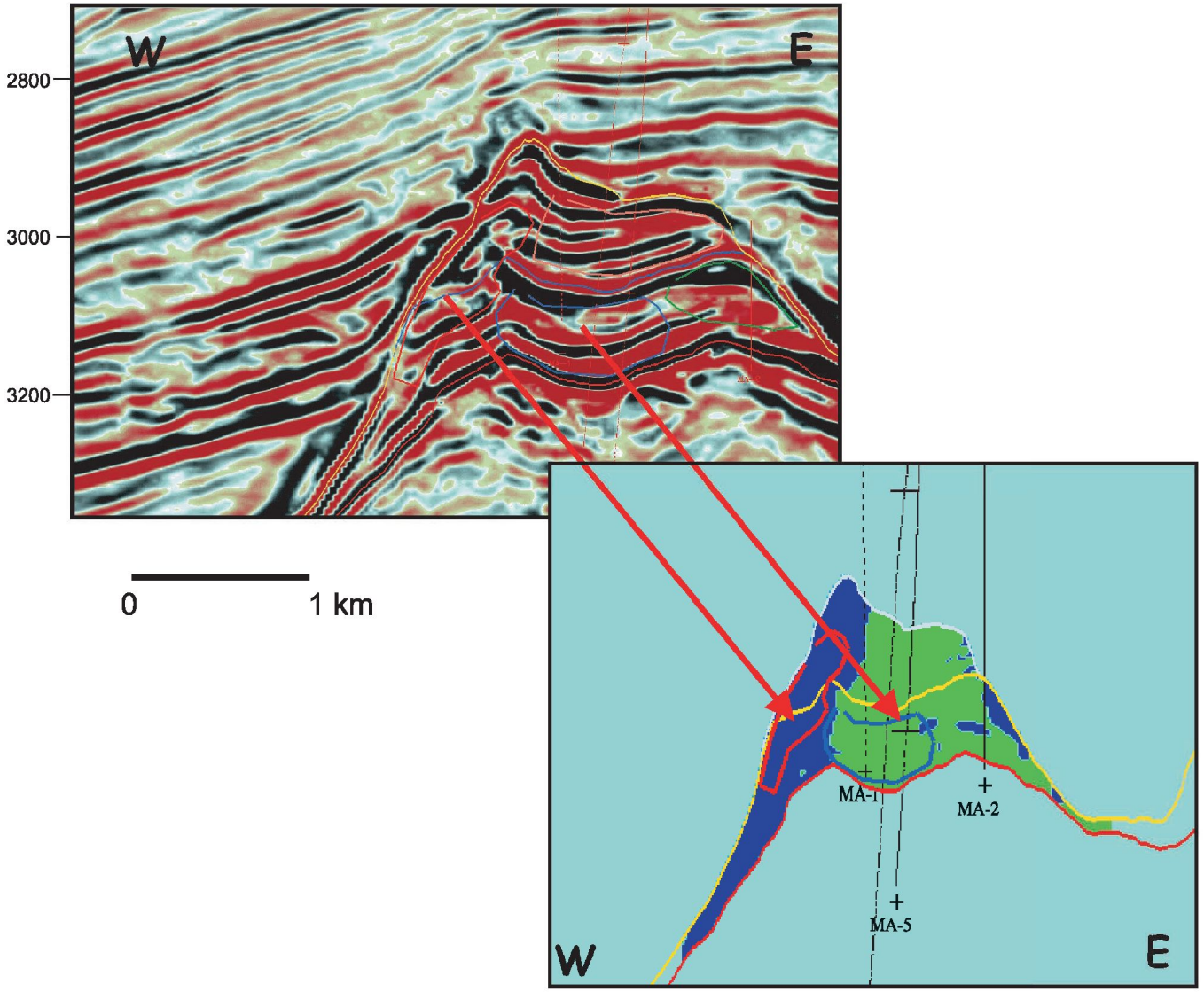
Сейсмогеологическая модель отложений с рифовой постройкой



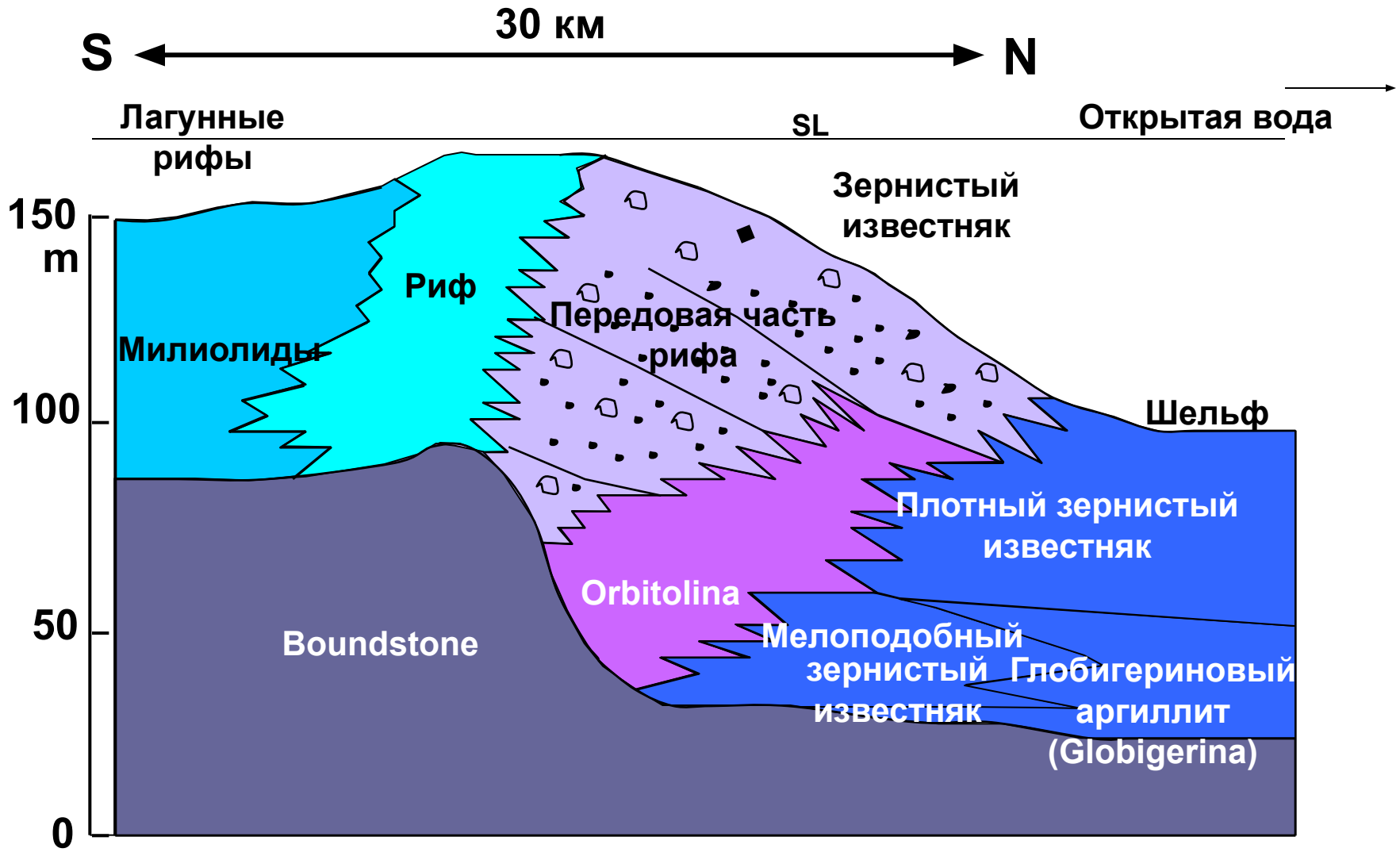




Пример анализа сейсмических атрибутов карбонатной постройки: ***зеленый*** – лагунные отложения с высокоамплитудными отражениями; ***синий*** – краевые фации с хаотичными прерывистыми отражениями; ***желтый и красный*** – кровля и подошва резервуара



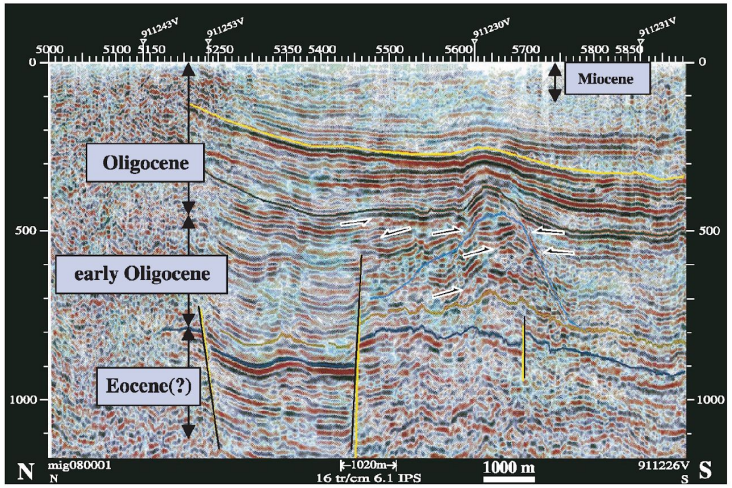
Система карбонатного рифа



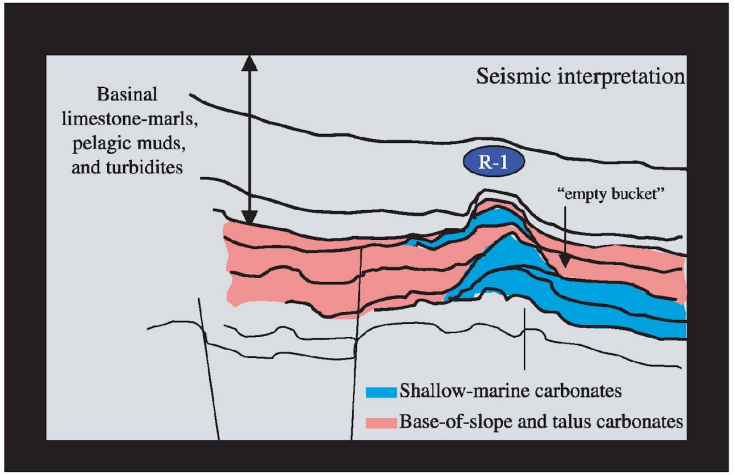
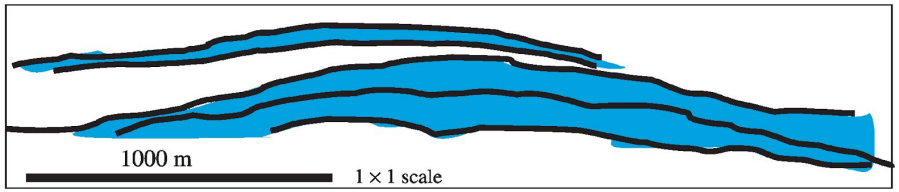
При интерпретации сейсмики необходимо учитывать строение природных карбонатных систем осадконакопления

Сейсмическая интерпретация 2D профиля, демонстрирующая миграцию мелководно-морской карбонатной постройки

(A)



(B)



(C)