

Обзор современных представлений по глубоководной седиментации и турбидитовым системам

А.М. Никишин

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
Геологический факультет**

**А.М. НИКИШИН, О.А. АЛЬМЕНДИНГЕР,
А.В. МИТЮКОВ, Х.В. ПОСАМЕНТИЕР, Е.В. РУБЦОВА**

ГЛУБОКОВОДНЫЕ ОСАДОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

**ОБЪЁМНЫЕ МОДЕЛИ,
ОСНОВАННЫЕ НА 3D СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ
И ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ**



**МОСКВА
2012**

Процессы Processes

Осадконакопление под действием силы тяжести

Осадки Deposits

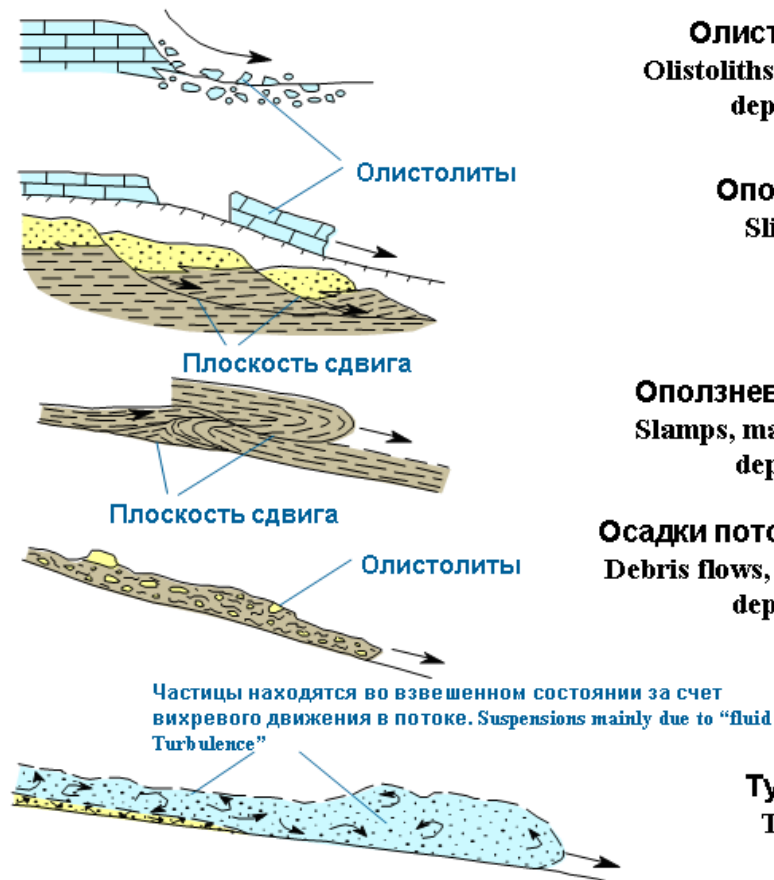
Обрушение пород
Rock fall

Смещение
sliding

Оползание
slumping

Движение масс
напр. обломочный поток,
debris flow

Турбидитный
(супензионный)
Поток
Turbidity current



Олистоолиты
Olistoliths, avalanche
deposits

Оползни
Slides

Оползневые потоки
Slumps, mass transport
deposits

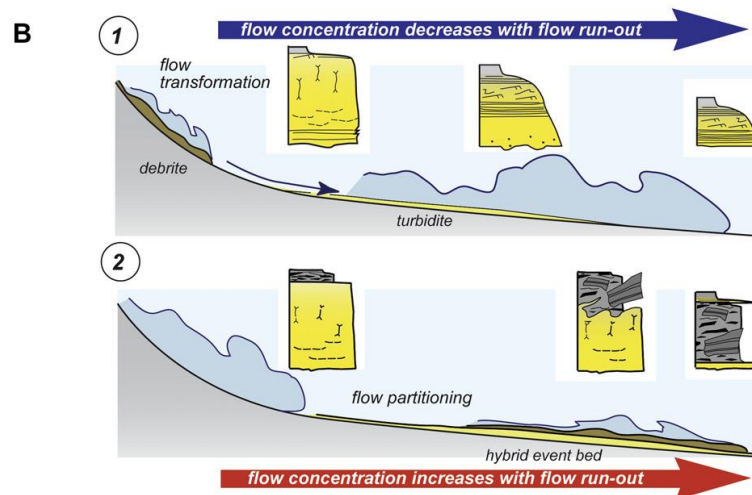
Осадки потока обломков,
Debris flows, mass transport
deposits

Турбидиты
Turbidites

Классификация типов осадконакопления происходящего под действием силы тяжести, широко принятая в настоящее время

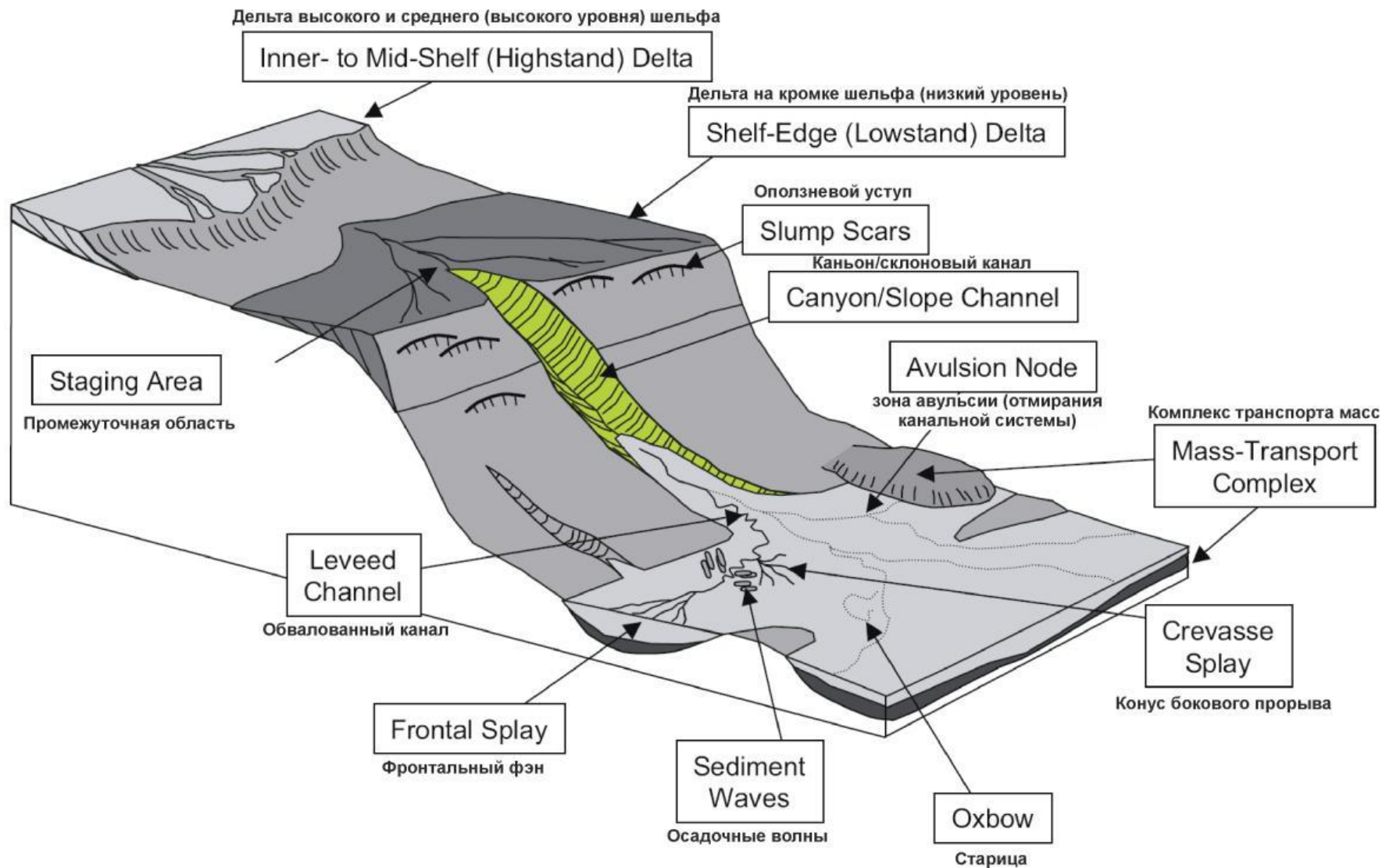
A

FLOW TYPE		FLOW STRUCTURE	BEHAVIOUR	DEPOSITS
DEBRIS FLOW	COHESIVE			
COMPOSITE/ CO-GENETIC FLOWS	MIXED			
HIGH-DENSITY TURBIDITY CURRENT	NON-COHESIVE			
LOW-DENSITY TURBIDITY CURRENT				



P. Haughton et al. /
Marine and Petroleum Geology 26
(2009) 1900–1918

(A) Classification scheme for event beds emplaced by subaqueous sediment gravity flows recognising that many are the deposits 'at a point' of systems and are arranged in facies tracts recording downslope transformation and increasing dilution of the flow (debrisites passing to high-density turbidites and eventually low-density turbidites down-dip), other systems show a down-dip progression for non-cohesive flows (depositing turbidites) to flows that are partitioned into sections with radically different rheology, with the deposits of cohesive flow components increasingly dominating in distal parts.



Блок-диаграмма показывающая геоморфологию района континентального склона и основные типы обстановок седиментации (Posamentier, Walker, 2006)

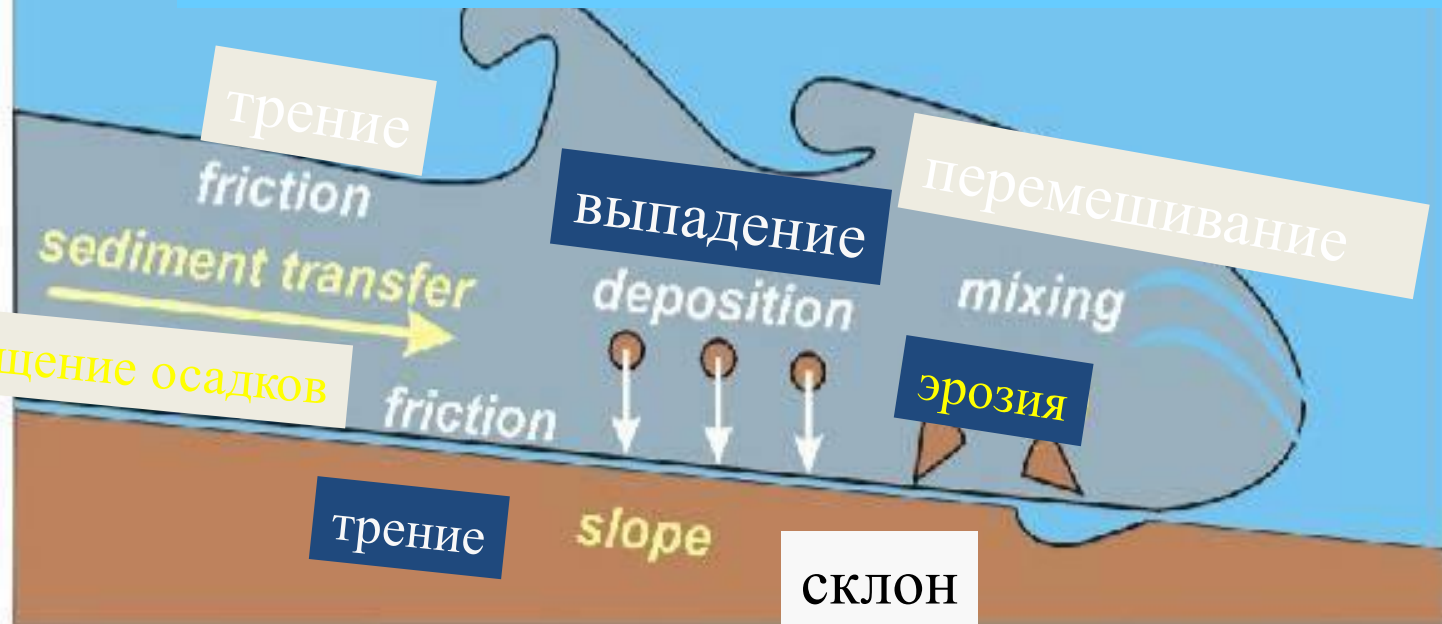
Турбидиты, общие положения

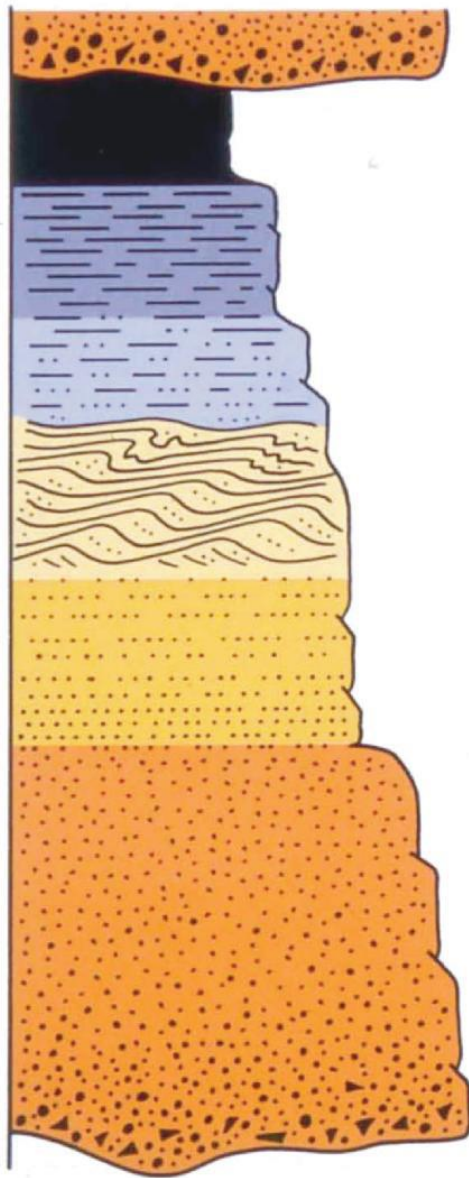
Мутьевые потоки

Факторы, поддерживающие турбидный поток

Factors maintaining the turbidity current
Factors diminishing the turbidity current

Факторы, замедляющие турбидный поток





E (h)

HEMIPELAGIC MUD
гемипелагический ил

E (t)

TURBIDITE MUD
турбидитовый ил

(D)

C

RIPPLED BED
слой с разнообразной
волнистостью

B

UPPER FLAT BED
верхний слой с
параллельной слоистостью

A

? RAPID DEPOSITION,
QUICK BED ?
быстрое осаждение осадка

Секвенция (цикл) Боума (1962) для классических турбидитов.
Подразделение «Е» разделено на E(t) (турбидитовые илы) и E(h)
(гемипелагические глины) (Posamentier, Walker, 2006)



Вид секвенции турбидитовых песчаников. Внизу песчаники безструктурные, выше с параллельной слоистостью, еще выше – с волнистой и конвolutной слоистостью. Отложения палеоцена района Анапы.



Слой песчаника с параллельной слоистостью. Вверху имеется косая слоистость. Отложения нижнего мела района Туапсе, пос. Мессажай.



Слой турбидитового песчаника. Внизу видна параллельная слоистость, в средней части слоистость с восходящей волновой рябью (climbing ripples), а в верхней – поверхность срезания. Отложения олигоцена, район Адлера-Красной Поляны (Западный Кавказ).



Диапироподобное тело в слое песчаников. Слой был насыщен водой и имел низкую плотность. После этого слой перекрылся новой секвенцией турбидитов и в нелитифицированном песчаном осадке произошло всплытие песчаного диапира. Отложения палеоцена района Анапы



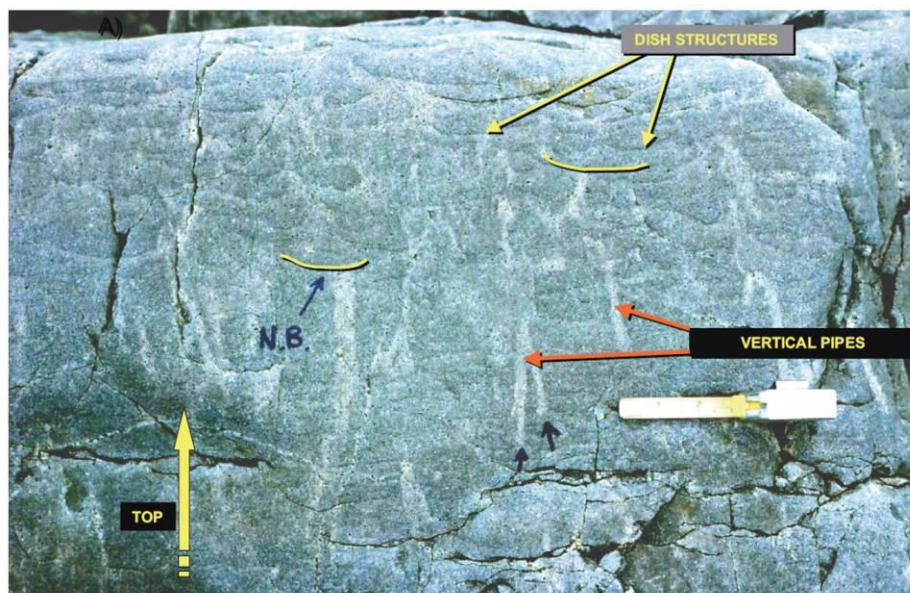
Пламеведные структуры (flame structures) в песчаниках. Образованы при внедрении вверх слоя песка обогащенного водой. Отложения нижнего мела района Туапсе (пос. Мессажай).



Складки оползания в мягком нелитифицированном осадке в турбидитовой толще с фоновыми карбонатными осадками в отложениях верхнего мела. Складки указывают на наличие палеосклона. Район Геленджика (Западный Кавказ)



Тонкие слои турбидитовых песчаников и алевролитов переслаиваются с фоновыми карбонатами. Карбонаты соответствуют слою E(h) цикла Боумы



Вертикальные трубки в слое песчаников – трубки выжимания воды (fluid-escape pipes), блюдцеобразные структуры (dish structures) располагаются выше трубок выжимания воды (Posamentier, Walker, 2006).



Вид сложной складчатой структуры в слое турбидитового песчаника. Деформации, вероятно, связаны с диапироподобным всплыванием песка, насыщенного водой, под давлением вышележащих осадков. Олигоцен, район Адлера-Красной Поляны (Западный Кавказ)

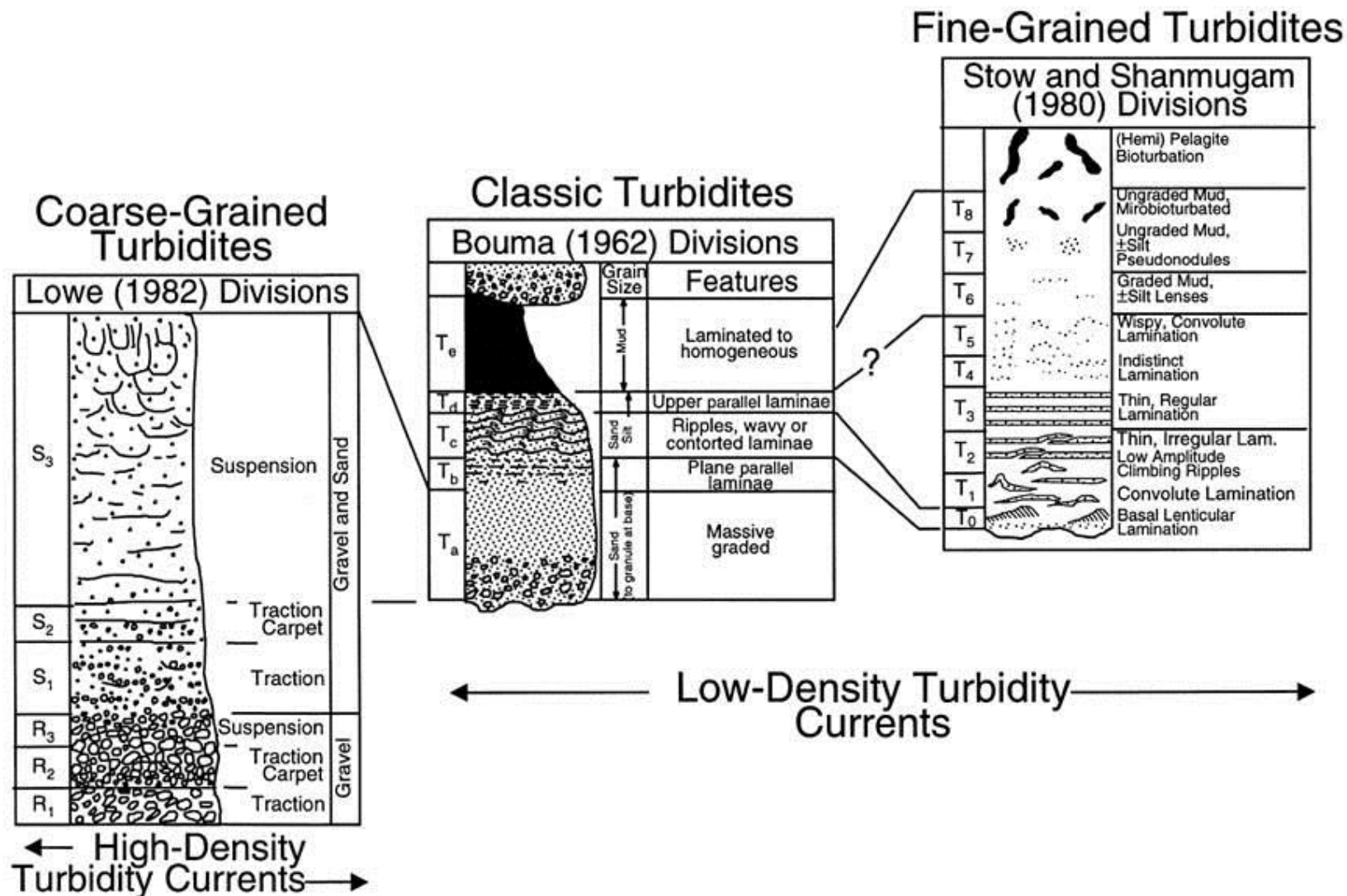
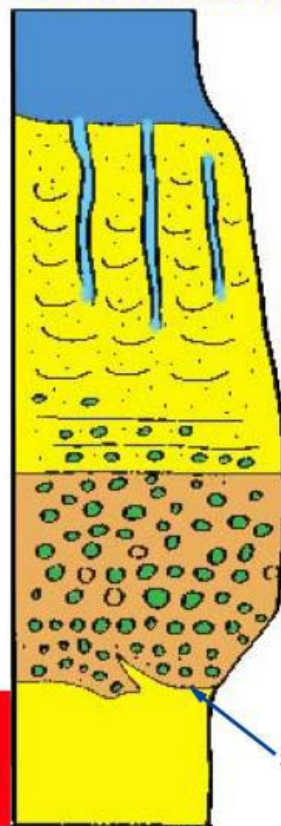


Fig. 23. Existing vertical facies models of (1) coarse-grained turbidites (Lowe, 1982), (2) classic turbidites (also known as the Bouma Sequence), and (3) fine-grained turbidites (Stow and Shanmugam, 1980). Correlation of the S₃ division of coarse-grained turbidites with the T_a division of the Bouma Sequence is after Lowe (1982). Correlation of various divisions between classic turbidites and fine-grained turbidites is after Pickering et al. (1989).

Три типа турбидитов по плотности турбидитового потока:
 грубозернистые, классические и тонкозернистые (Shanmugam, 2000)

КРУПНОЗЕРНИСТЫЕ



--S₂ - песок и алевроит с блюдцеобразной и трубчатой текстурой удаления воды. Кровля резкая или ровная

--S₂ - градационно-стратифицированный песок

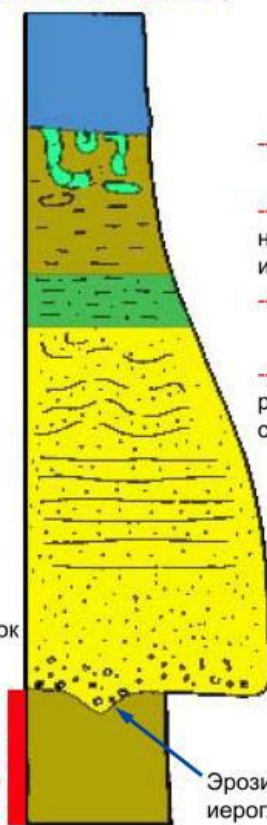
--S₁ - стратифицированный разнозернистый песок

--R₂ - крупнозернистый песок с массивной слоистостью

--R₁ - гравийно-галечный песок или крупнозернистый песок с обратной градационностью

Эрозионная поверхность

СРЕДНЕЗЕРНИСТЫЕ ("КЛАССИЧЕСКИЕ")



--Te(h) - биотурбированный ил

--Te(t) - бесструктурный и неясно-градационный иловый интервал

--Td - горизонтально-слоистый ил

--Tc - песок с косой слоистостью ряби или конволютной слоистостью

--Tb - горизонтально-слоистый песок

--Ta - градационный песок с гравием и галькой, часто бесструктурный, с текстурами удаления воды, редко - с антидюнами

Эрозионная поверхность, иероглифы

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ



--T₈ - микробиотурбированный ил

E₃

--T₇ - несортированный алевроитистый ил

E₂

--T₆ - сортированный алевроитистый ил

--T₅ - тонкослоистый ил

E₁

--T₄ - иловый алевроит с неясно-горизонтальной слоистостью

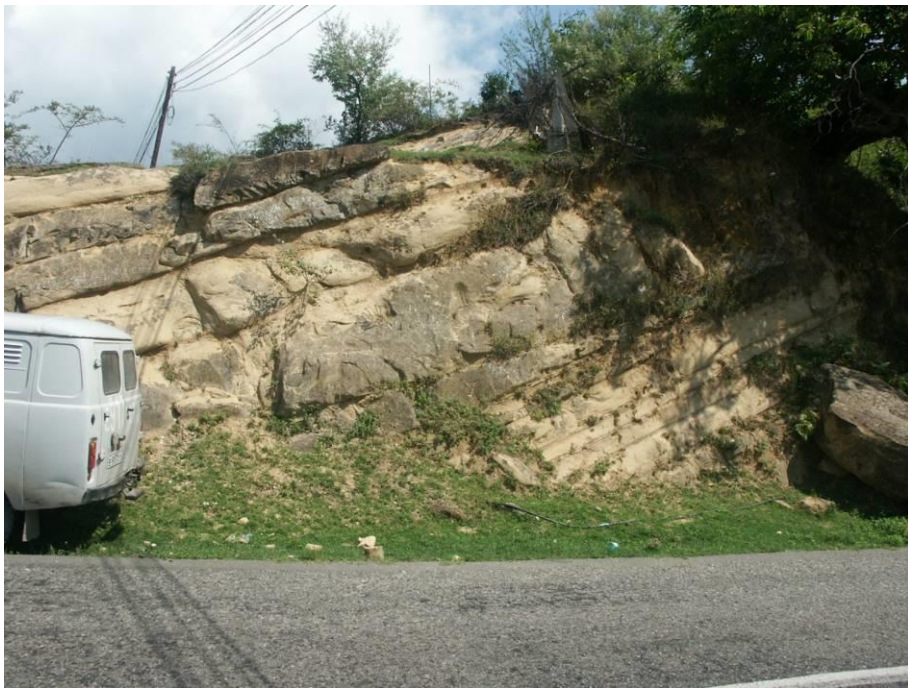
--T₃ - иловый алевроит с горизонтальной слоистостью

--T₂ - иловый алевроит с малоамплитудной волнистостью

--T₁ - ил с конволютными алевроитовыми прослоями

--T₀ - базальный алевроит со слабой волнистостью в кровле

Эрозионная поверхность, иероглифы



Толща олигоценовых песчаников с амальгамацией отдельных слоёв песчаников.
Район Адлера-Шиловки, Западный Кавказ



На границе слоёв песчаников с амальгамацией имеется горизонт с кластами глин. Район Адлера, отложения олигоцена.



Вид пачки турбидитовых песчаников с амальгамацией отдельных слоёв песчаников. Отложения нижнего мела, район Геленджика-Возрождение Западный Кавказ



Фотография фрагмента разреза, показанного на предыдущем рисунке. Видно, что на границе слоев песчаников наблюдается горизонт с рассеянной галькой.



На подошве слоя песчаников наблюдаются flute casts (отпечатки желобков). Отложения олигоцена, район Сочи-Дагомыса



На подошве слоя песчаников наблюдаются отпечатки желобков. Длинный протяженный валик, вероятно, образован по борозде созданной движением фрагмента породы; это groove cast (отпечаток борозды). Отложения олигоцена, район Адлера



FLUTE



Толща турбидитов со слоями конгломератов с песчаным матриксом. Отложения келловее-оксфорда района Орджоникидзе, Крым.

Осадки транспорта масс
Mass transport deposits



Фотография оползневого тела на суше. Хорошо видно, что в верхней части тела имеются многочисленные сбросы, а в нижней наблюдаются деформации сжатия. Фото Х. Посаментьера.

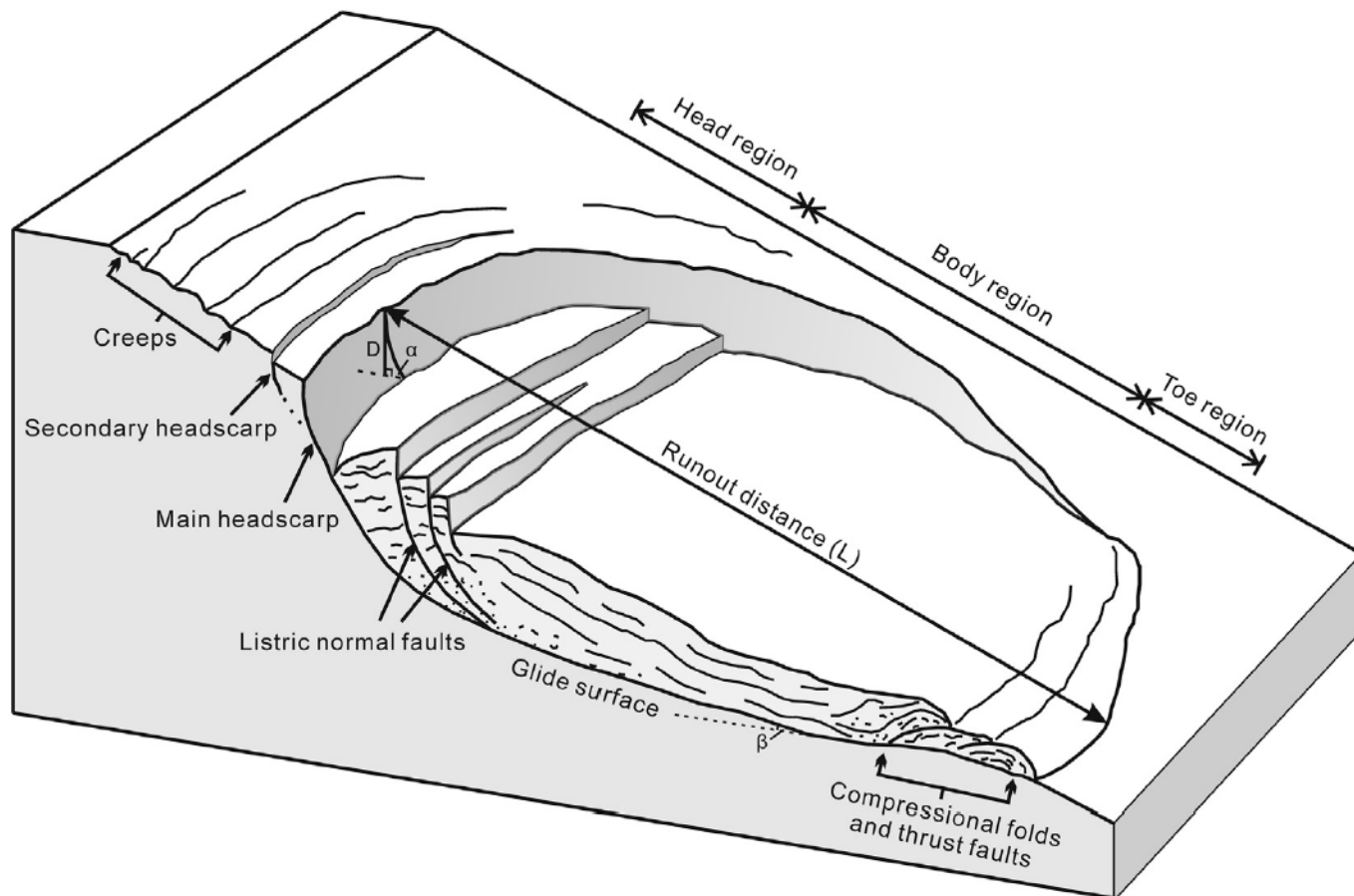


Figure 2. Conceptual map showing the main geomorphologic elements and recognition criteria of a submarine landslide from observations in the study area, including main and secondary headscarps, glide surface, displaced mass, listric normal faults on the head region and compressional folds and inverse faults at the toe of a landslide. D and L are the height of headscarp and the runout distance, respectively. α and β denote angles of the headscarp and the glide surface, respectively.

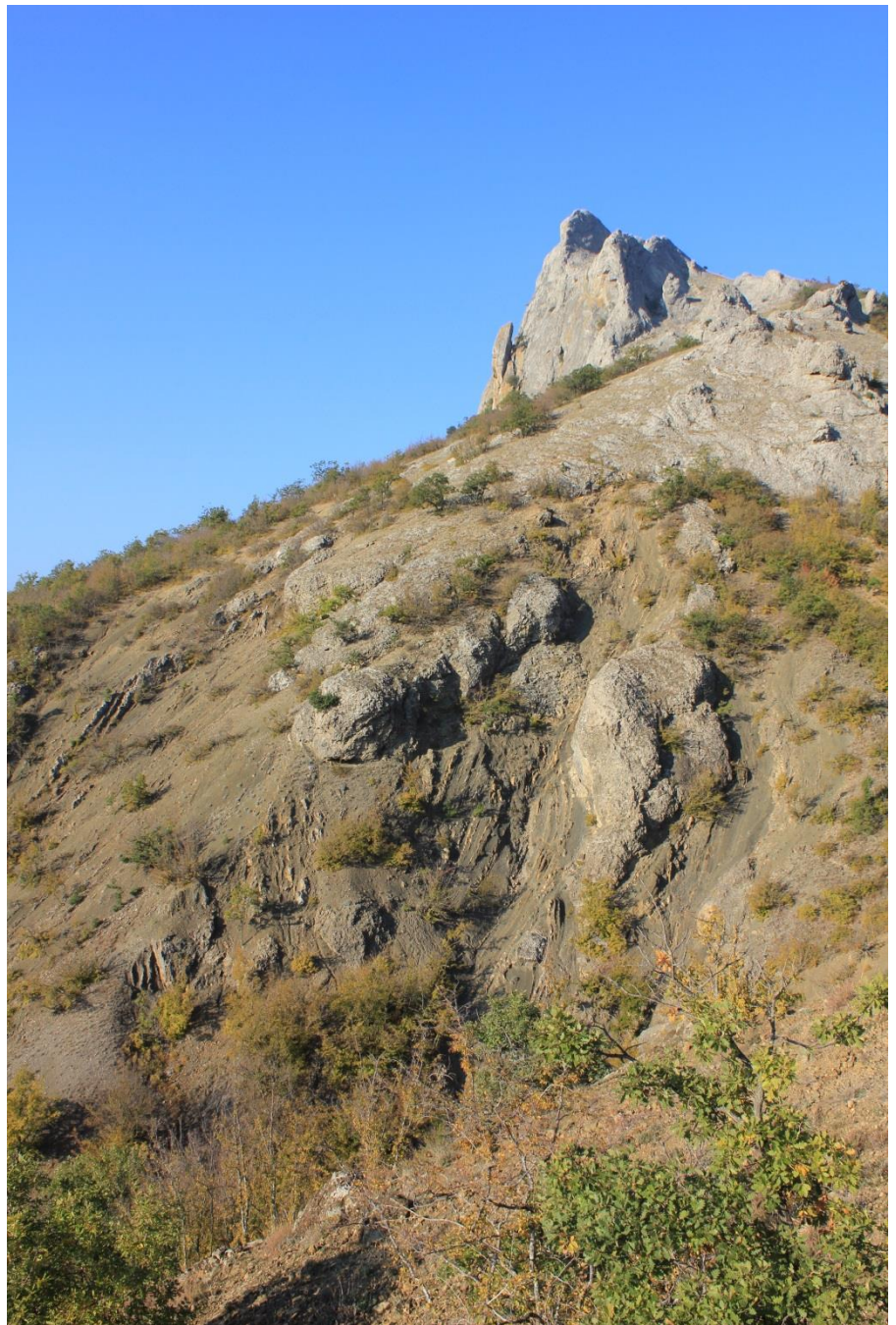


Олистолит позднеюрских известняков в раннемеловых валанжинских турбидитах. Район Судака, Крым



Светлая скала образования олистолитом позднеюрских известняков в раннемеловых валанжинских турбидитах. По простиранию один большой олистолит распадается на цепочку небольших тел. Гора Лягушка, район Судака в Крыму.

Олистолит позднеюрских известняков в
раннемеловых валанжинских турбидитах.
Район Судака, Крым



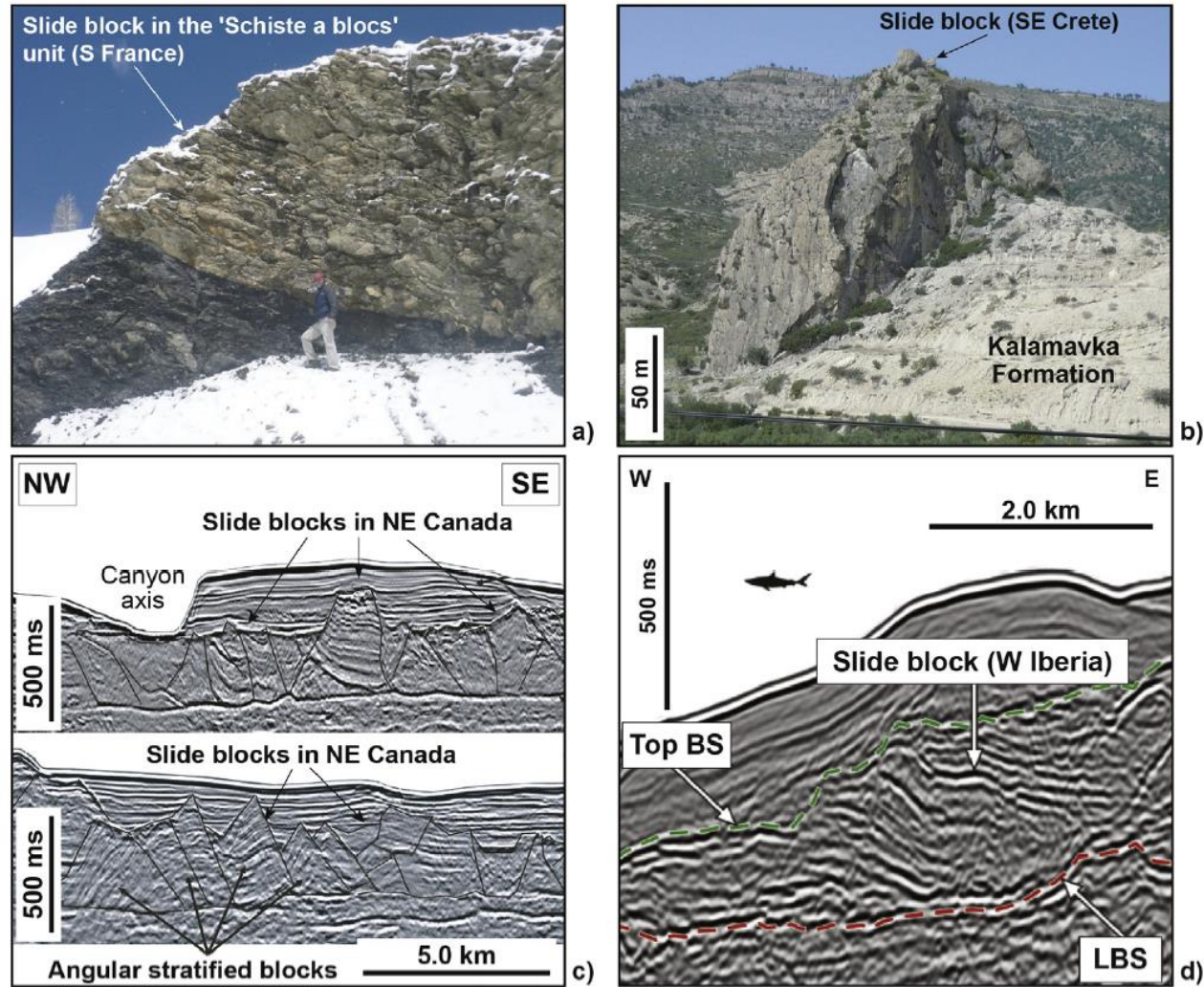
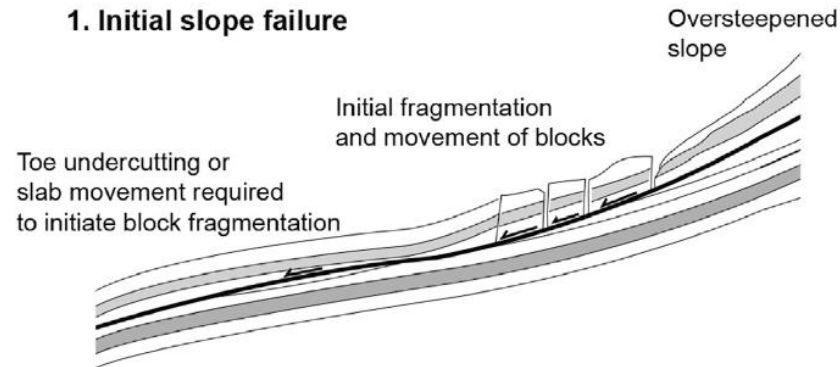
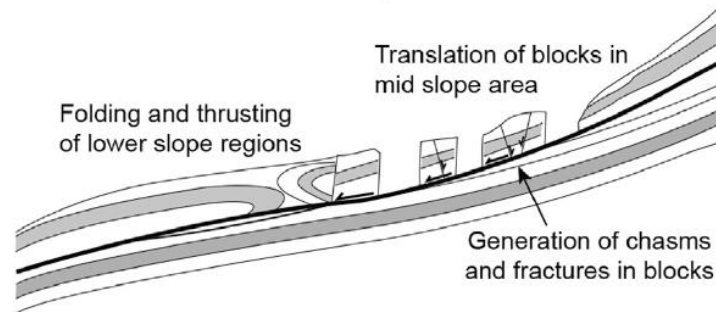


Figure 4. Examples of blocks referred to in this paper. (a) Detail of the lithological character of the 'schiste à blocs' unit from the western Alps, SE France. The 'schiste à blocs' were deposited adjacently to a W- and SW-moving series of thrust alpine nappes that were exhumed and eroded in the Paleogene (Dumont et al., 2012). (b) Rafted block from the Ierapetra palaeoslope, SE Crete. The imaged block is 140-m high and is interbedded with marine sands and clays of Tortonian age (Fortuin, 1977; Alves and Lourenço, 2010). (c) Blocks from the glaciated margin of Labrador, suggestively triggered by local earthquakes. The width of blocks in this example reach more than 1 km for a height exceeding 500 ms (200–300 m; Deptuck et al., 2007). (d) Detail of rafted blocks from West Iberia generated during continental breakup (Soares et al., 2014). Top BS refers to the top of a *breakup sequence* as defined by the latter authors. LBS refers to *Lithospheric Breakup Surface* as defined by Soares et al. (2014).

1. Initial slope failure



2. Translation and buttressing of blocks



3. Exhumation and erosion

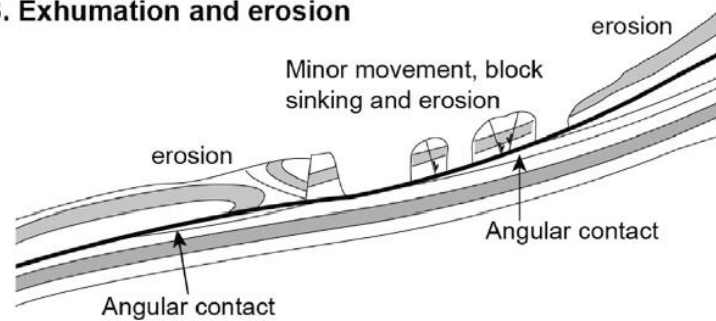


Figure 16. Model of block fragmentation and movement in SE Crete, highlighting the structural features formed during specific evolution stages. Modified from [Gee et al. \(2005\)](#) and [Alves and Lourenço \(2010\)](#).

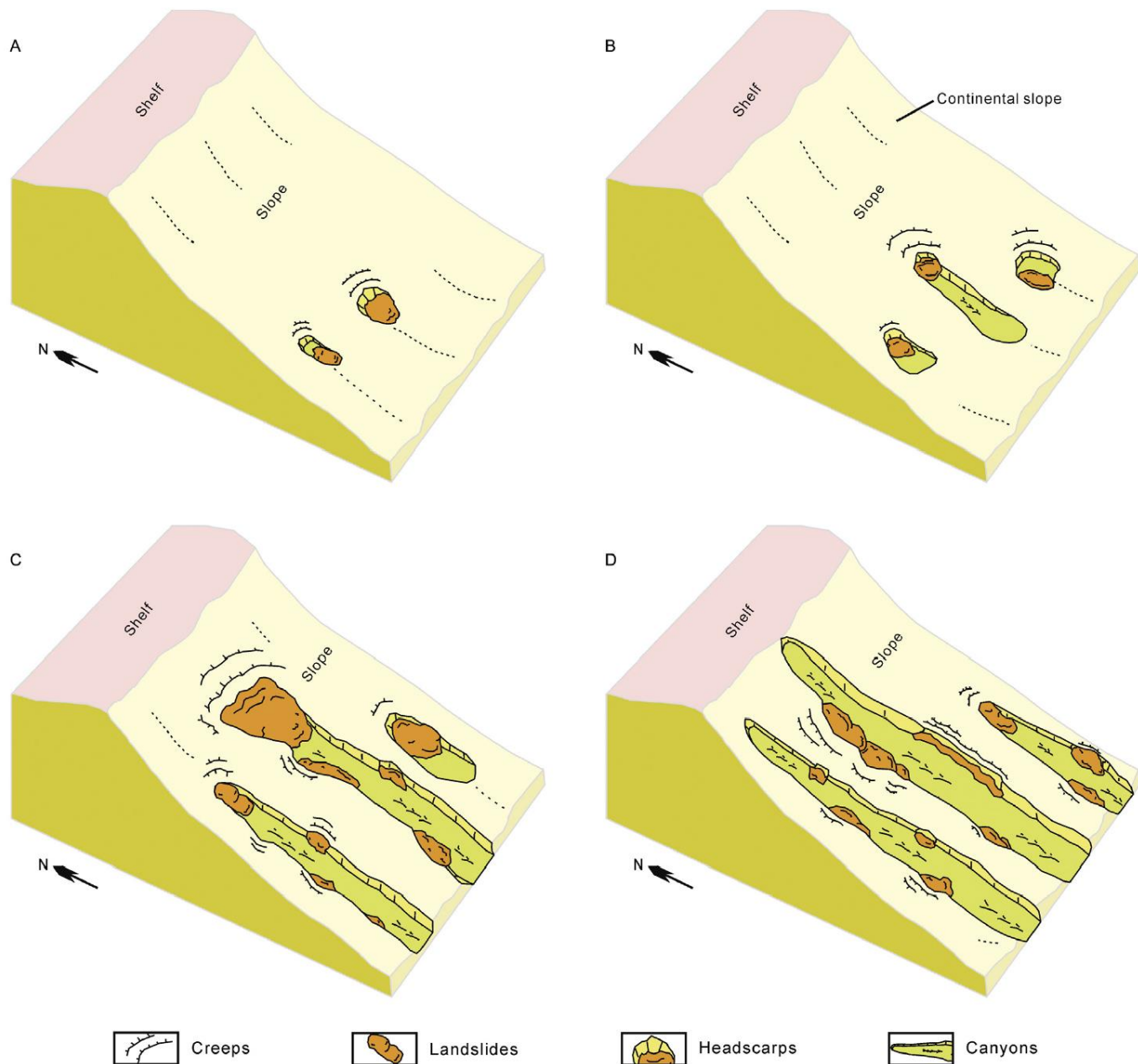
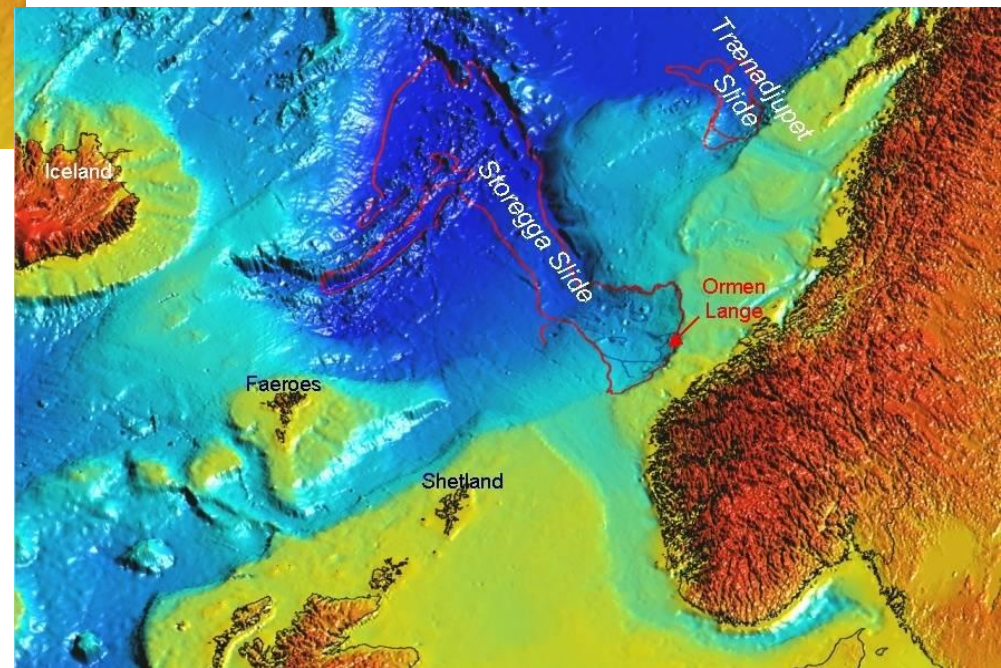
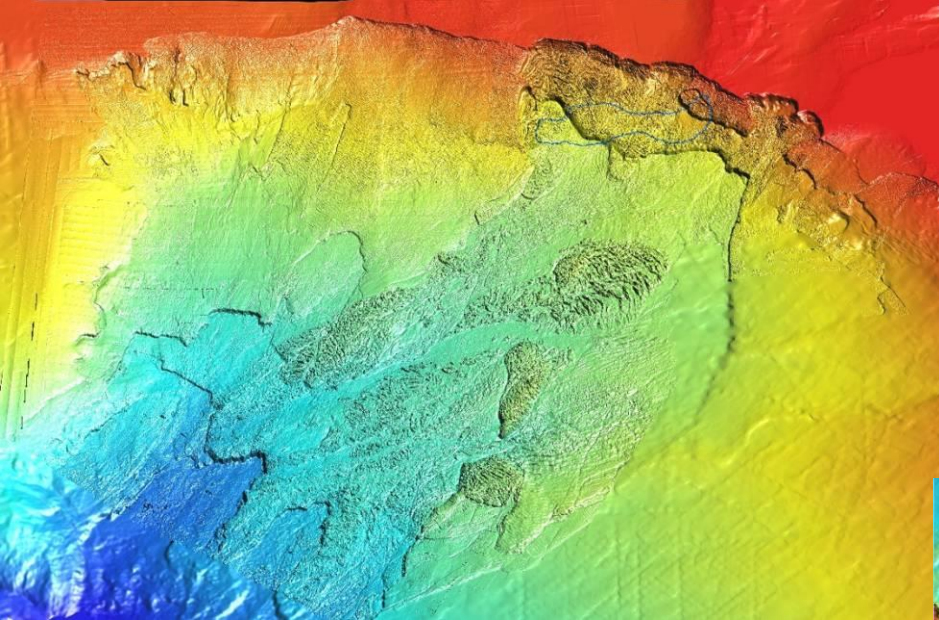


Figure 13. Conceptual model showing the co-evolution of the canyons and associated landslides in the study area. (A) Stage 1, small gullies are formed by initial landsliding on one or more sites of steeper gradients on the continental slope. (B) Stage 2, successive retrogressive landsliding on the gully heads made the gullies extend upslope to form the initial canyons. (C) Stage 3, incision makes the canyon walls steeper, which further triggers landslides around the canyons, and the landslides make the canyon widen and/or migrate laterally. Both events alternate to enlarge the canyons. (D) Stage 4, as time lapses, the canyons mature gradually.



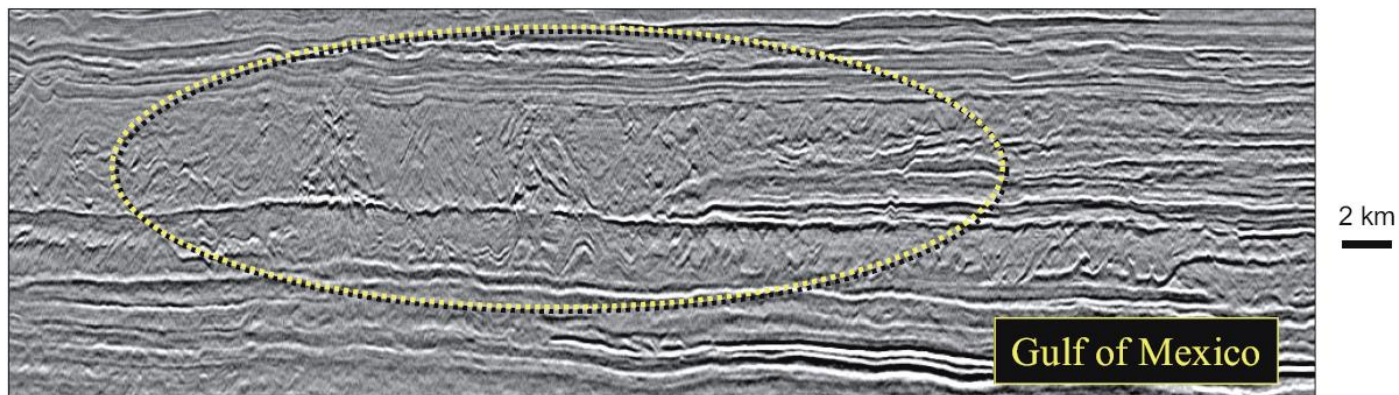
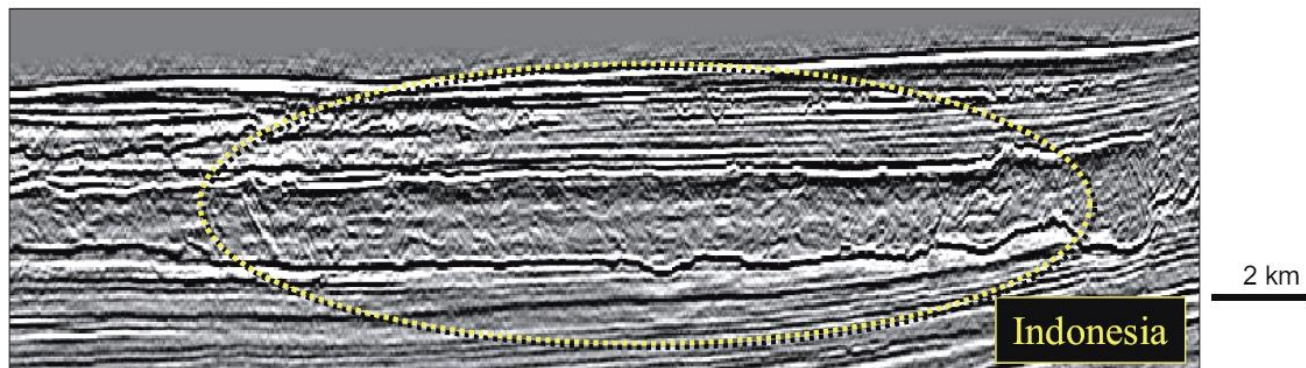
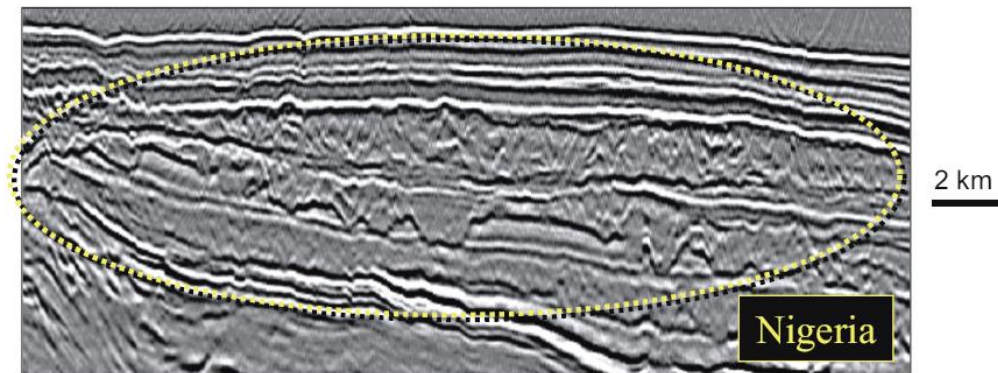
Горизонт слампа, образованного оползшим и дезинтегрированным слоем глин с редкими кластами карбонатов. Хорошо видны фрагменты слоистых глин. Олигоцен, район Агойского пляжа у г. Туапсе



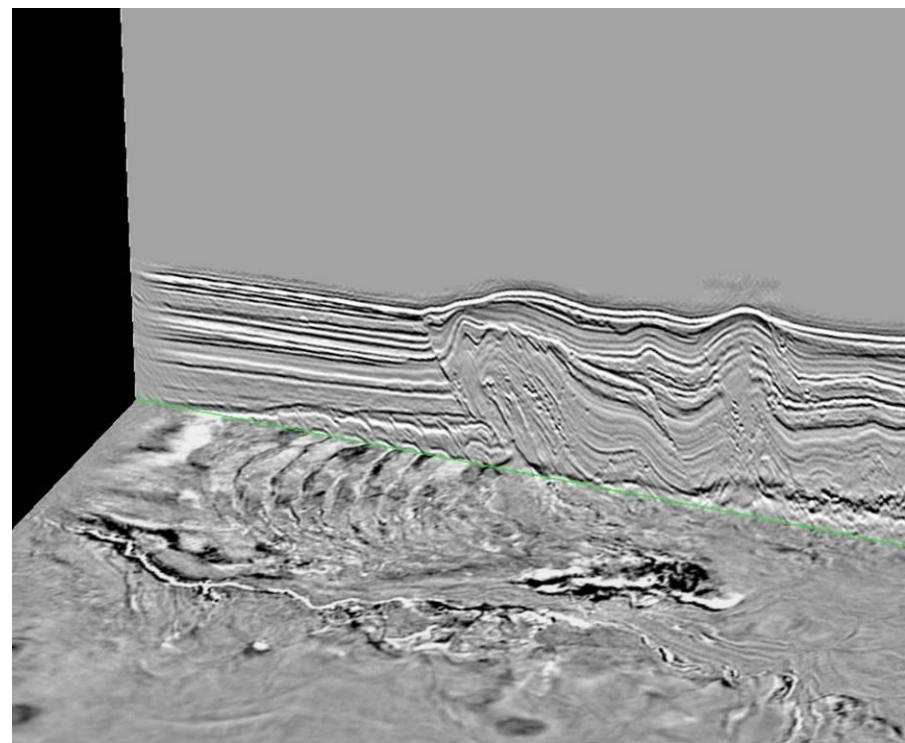
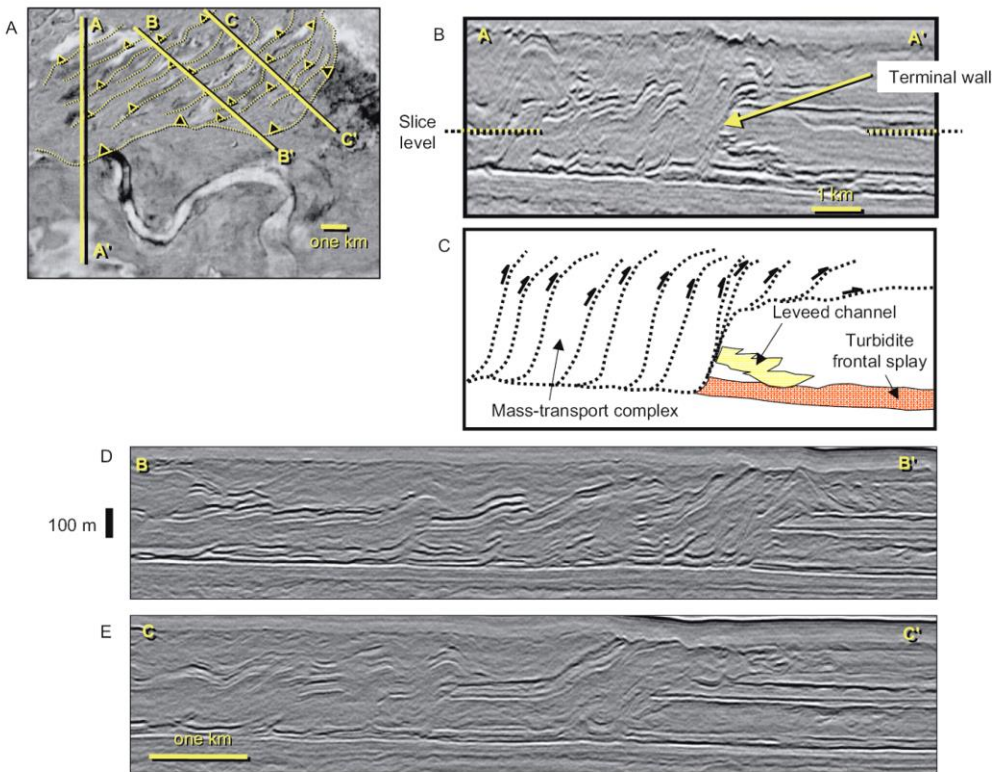
Топография дна с крупным оползневым потоком Сторегга на пассивной континентальной окраине Норвегии. Вверху топография склона, внизу более региональная карта с показом контуров всего оползневого потока (Kvalstad et al., 2005)



Фотографии горизонтов дебритов в толще олигоценовых глин. Район Агойского пляжа у г. Туапсе

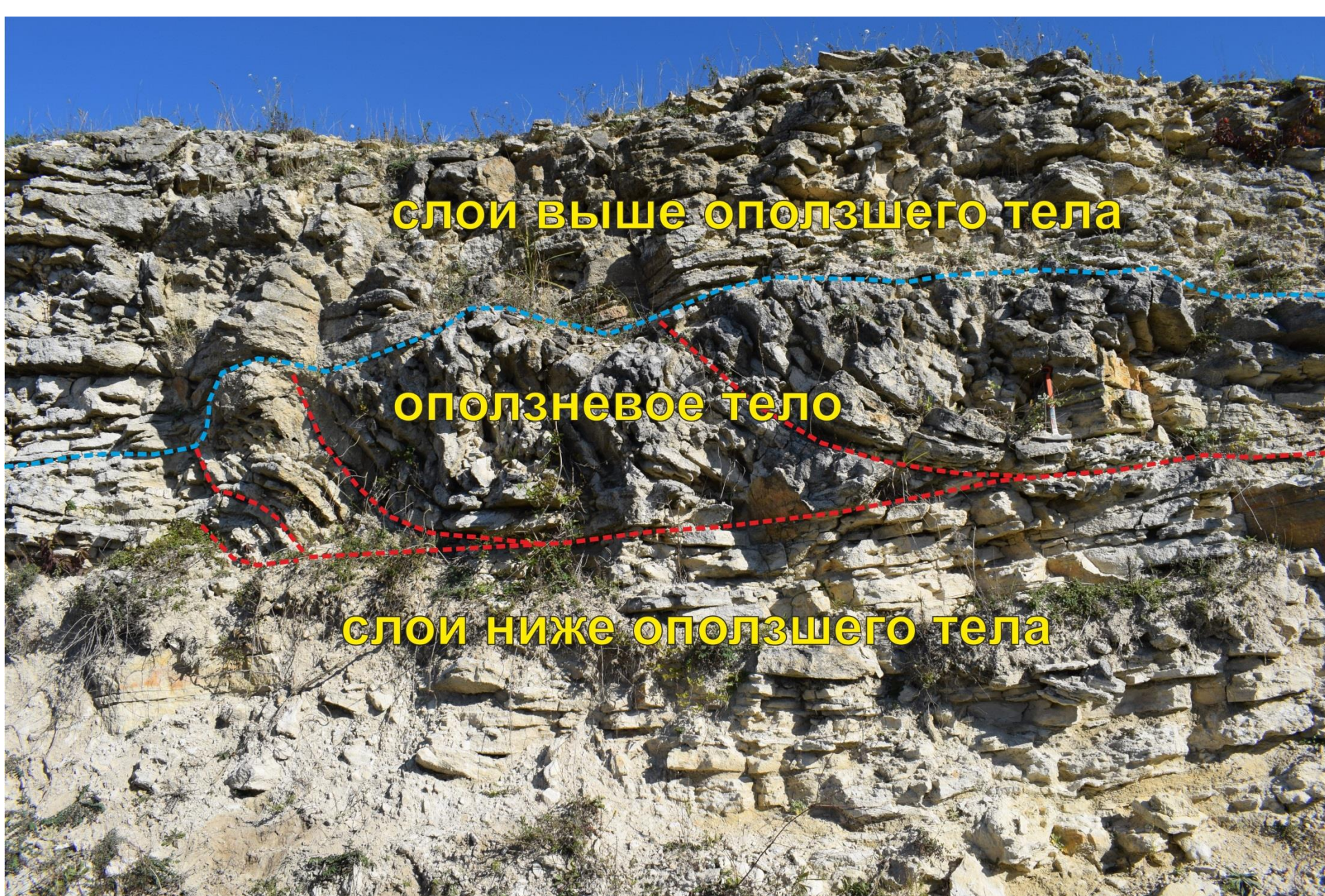


Разрезы с горизонтами отложений транспорта масс (mass-transport deposits).
Каждый такой горизонт характеризуется хаотической сейсмофацией. (Posamentier, Walker, 2006)



Отложения транспорта масс часто образуют систему надвигов на склоне с подошвенным детачментом (срывом). На верхнем рисунке показан сейсмический слайс (A) с положением разрезов и сами разрезы. На нижнем рисунке показан сейсмический слайс и разрез к нему. Хороши видна геометрия разломов (Posamentier, Walker, 2006).



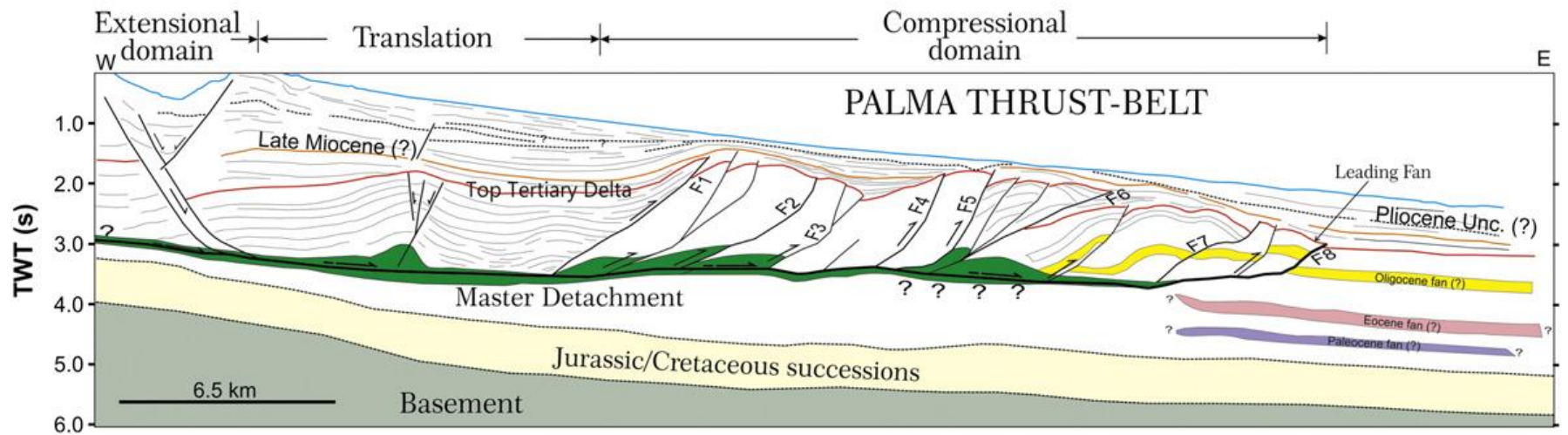
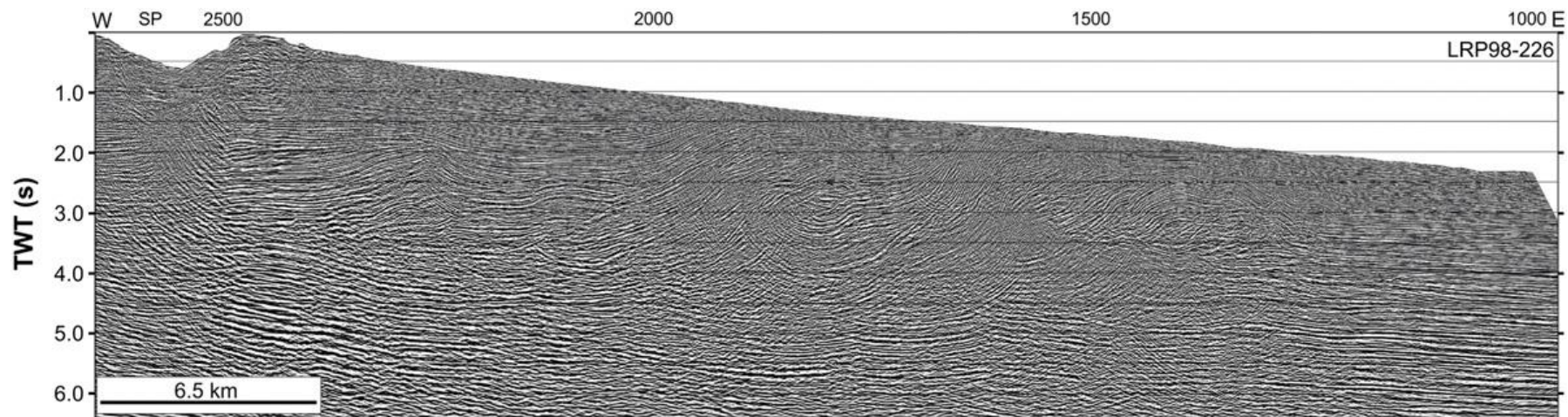


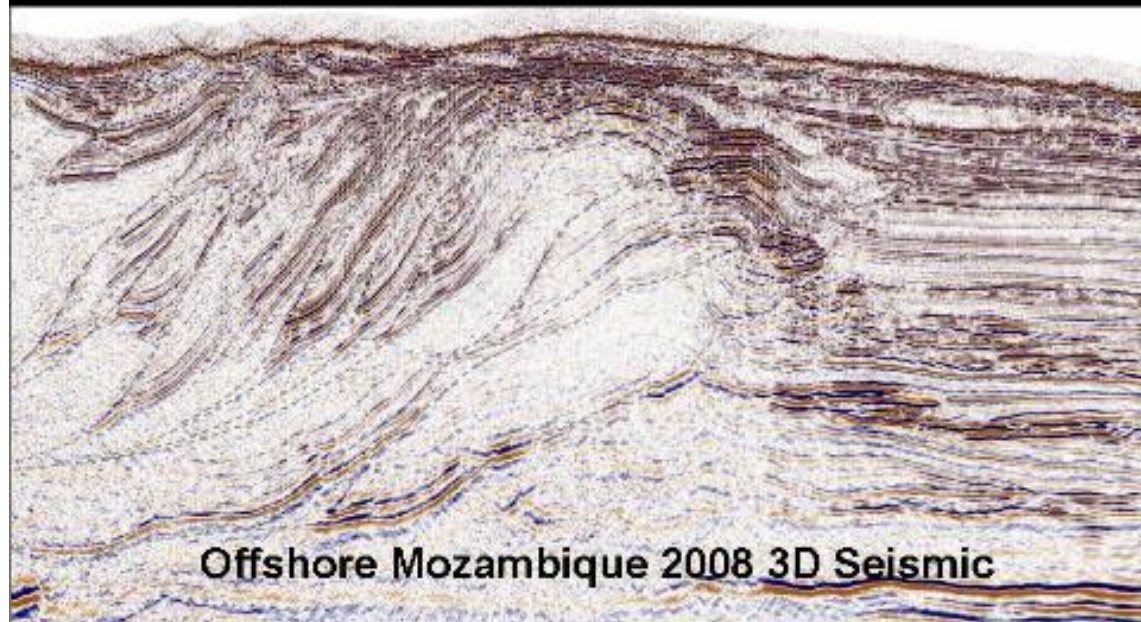
слои выше оползшего тела

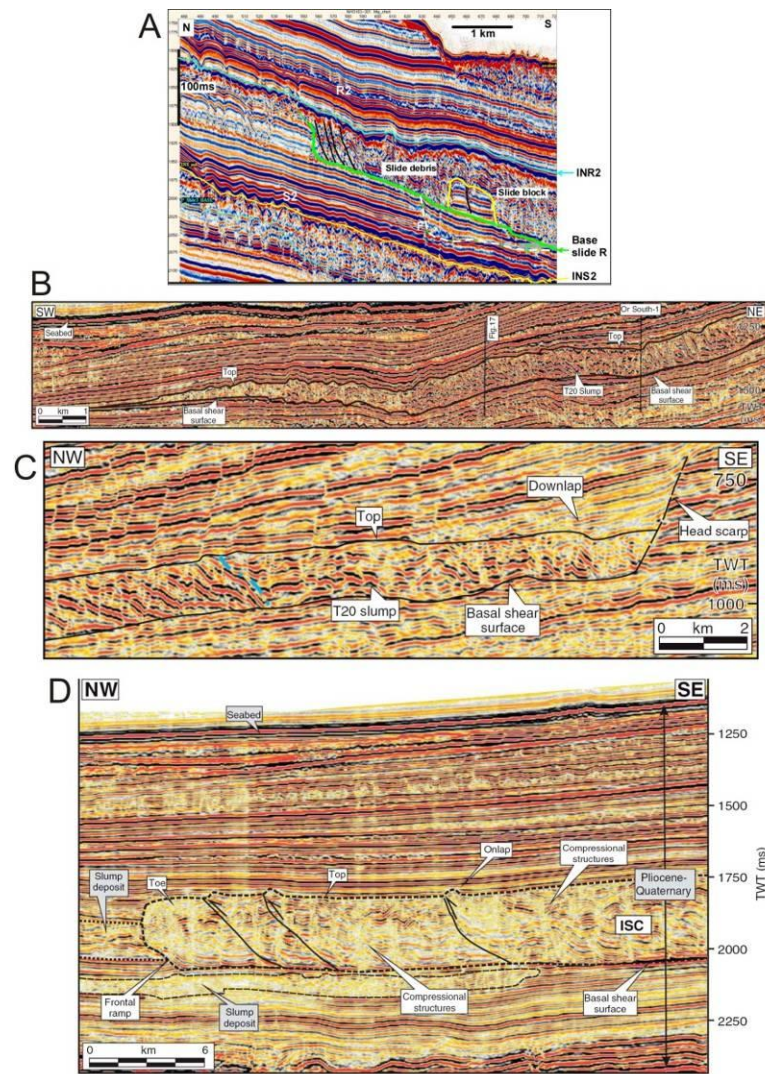
оползневое тело

слои ниже оползшего тела

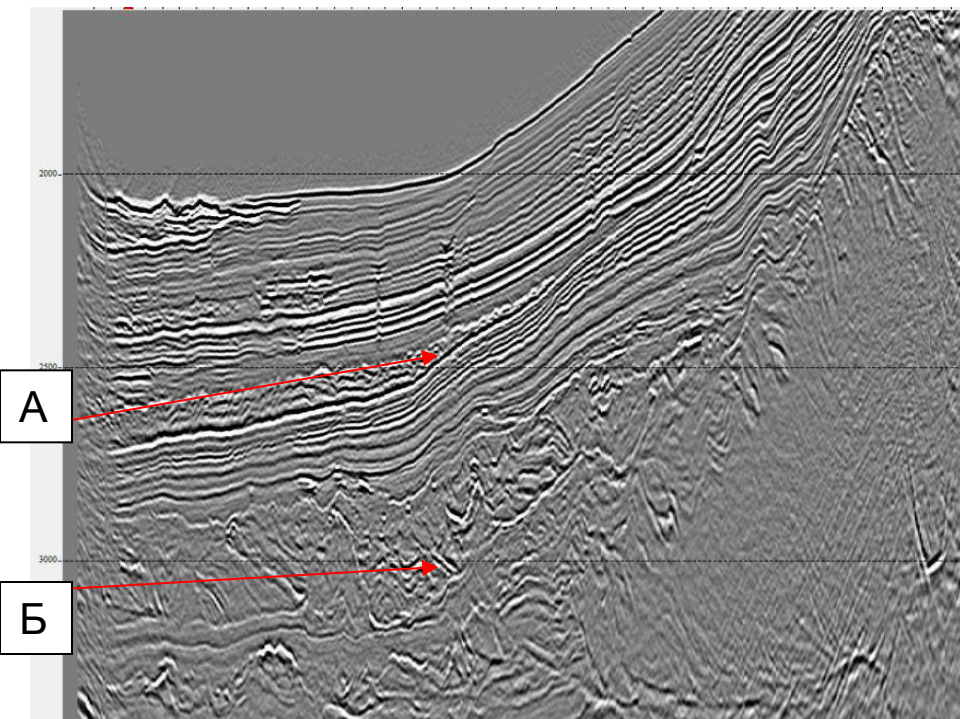
Оползшее тело. Миниатюрная модель mass-transport deposits. А. Никишин, Г. Баскакова







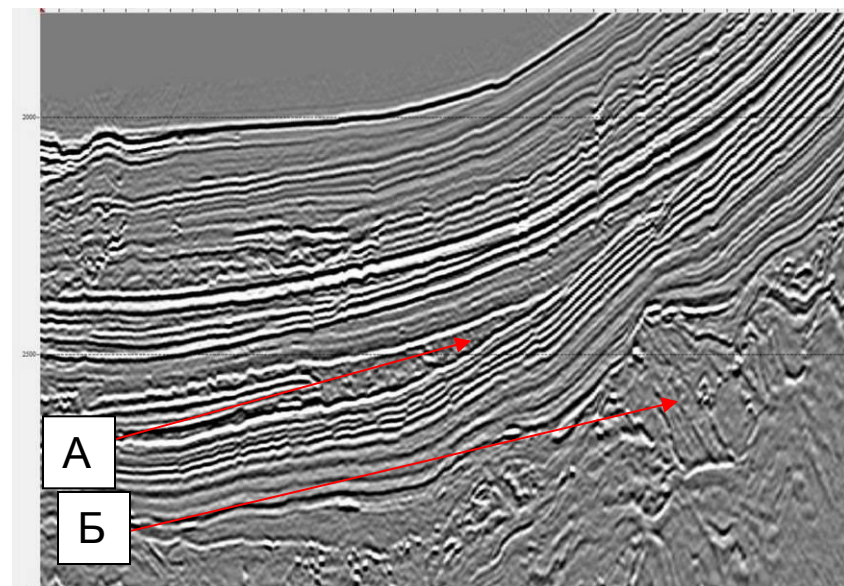
Примеры интерпретации отложений транспорта масс на сейсмических профилях. А. Фрагмент профиля для района оползневого потока Сторегга на континентальном склоне Норвегии. Это верхняя часть склона, для которого характерно оползание и сопутствующее растяжение. Видны сбросы, вероятные обломочные потоки (slide debris) и крупные оползшие блоки (slide block или олистолит) (Solheim et al., 2005). В, С, D. Фрагменты профилей для континентального склона Средиземного моря в Израиле (Frey-Martinez et al., 2006). Хорошо видны оползневые потоки (slumps), на "D" четко видны взбросы и структуры сжатия в потоке.



Фрагмент сейсмического профиля для блока «Т» в дельте Нигера.

А – вероятная толща отложений транспорта масс. Так как она выклинивается вверх по склону, то вероятно она формировалась в эпоху низкого стояния моря, для которой типично формирование обломочных потоков на склоне.

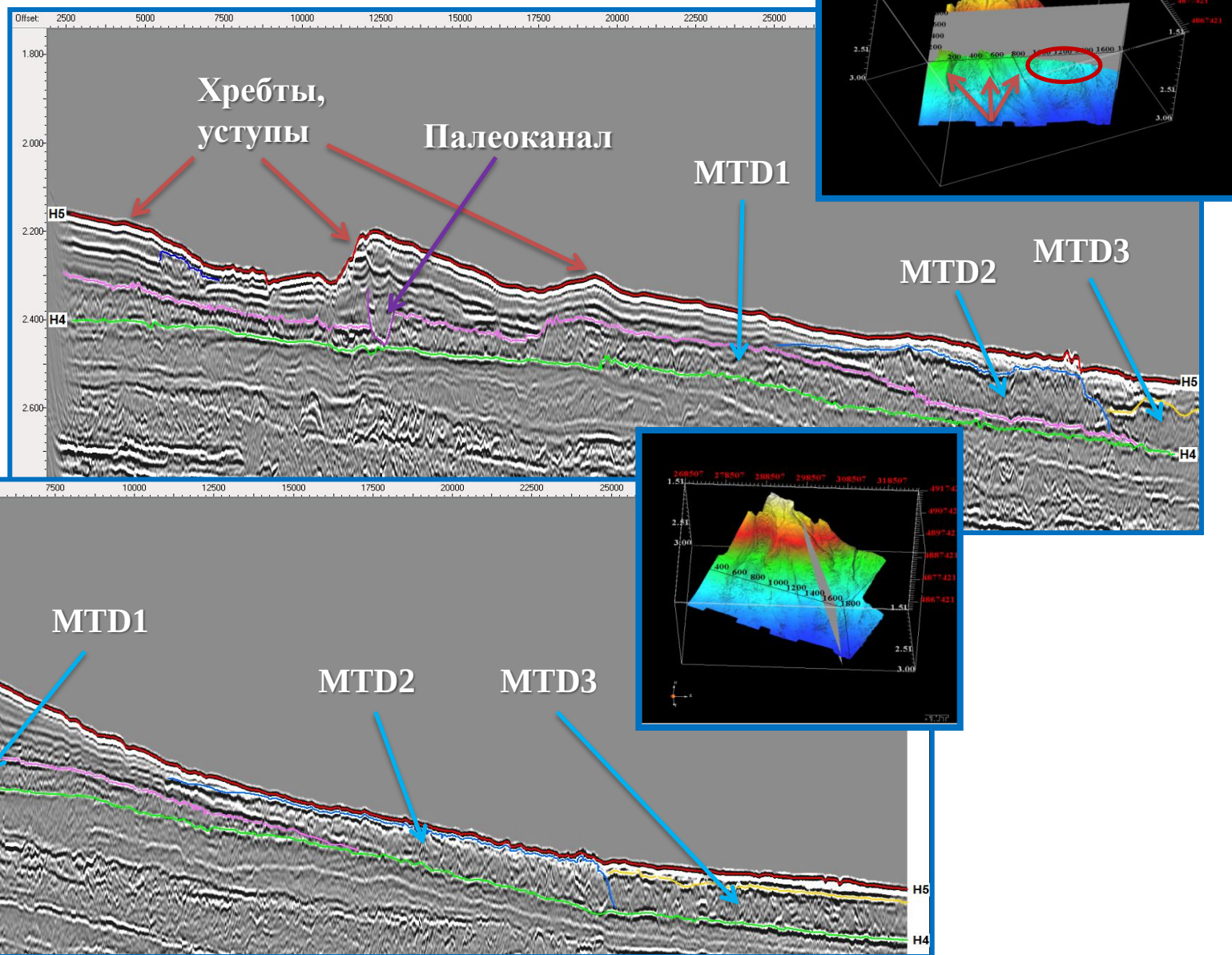
Б – горизонт с крупными телами оползневого потока, наклонные рефлексоры могут быть взбросами в нижней части склона с нагромождением оползших тел.



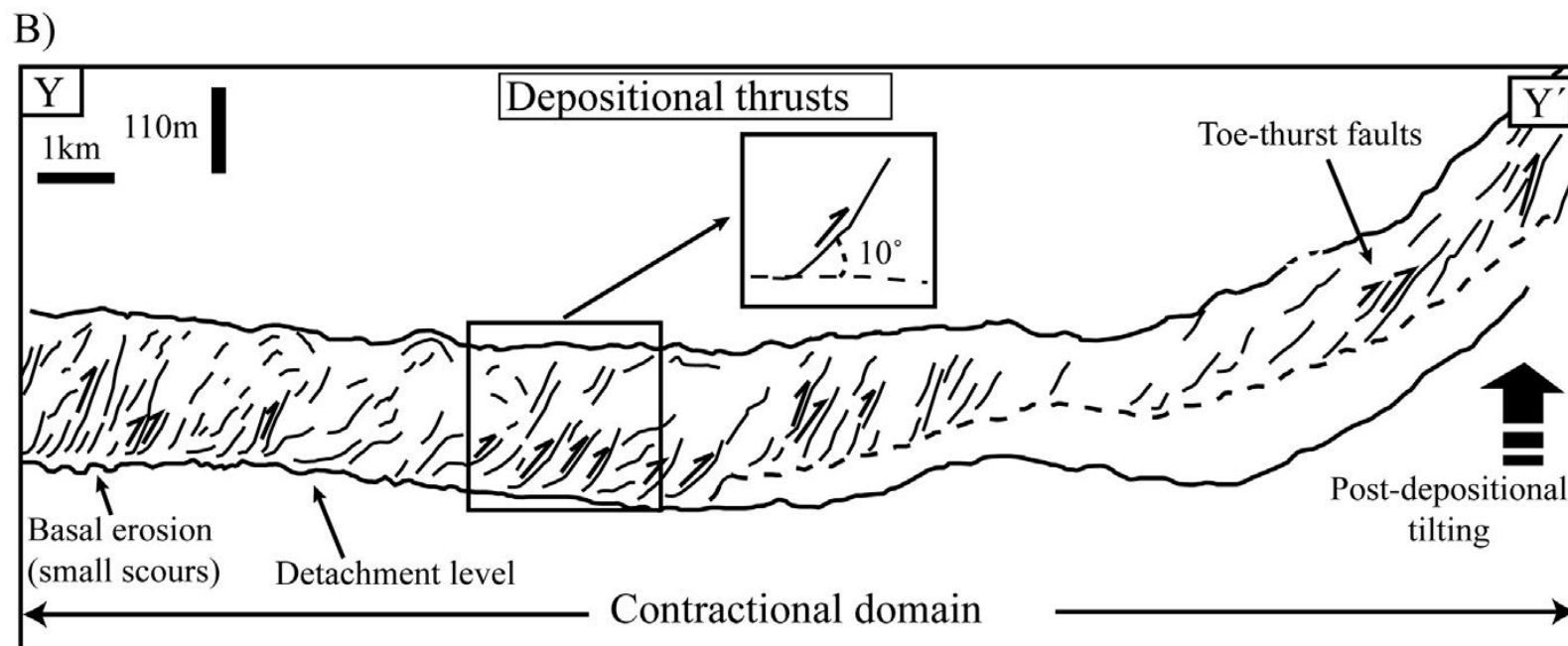
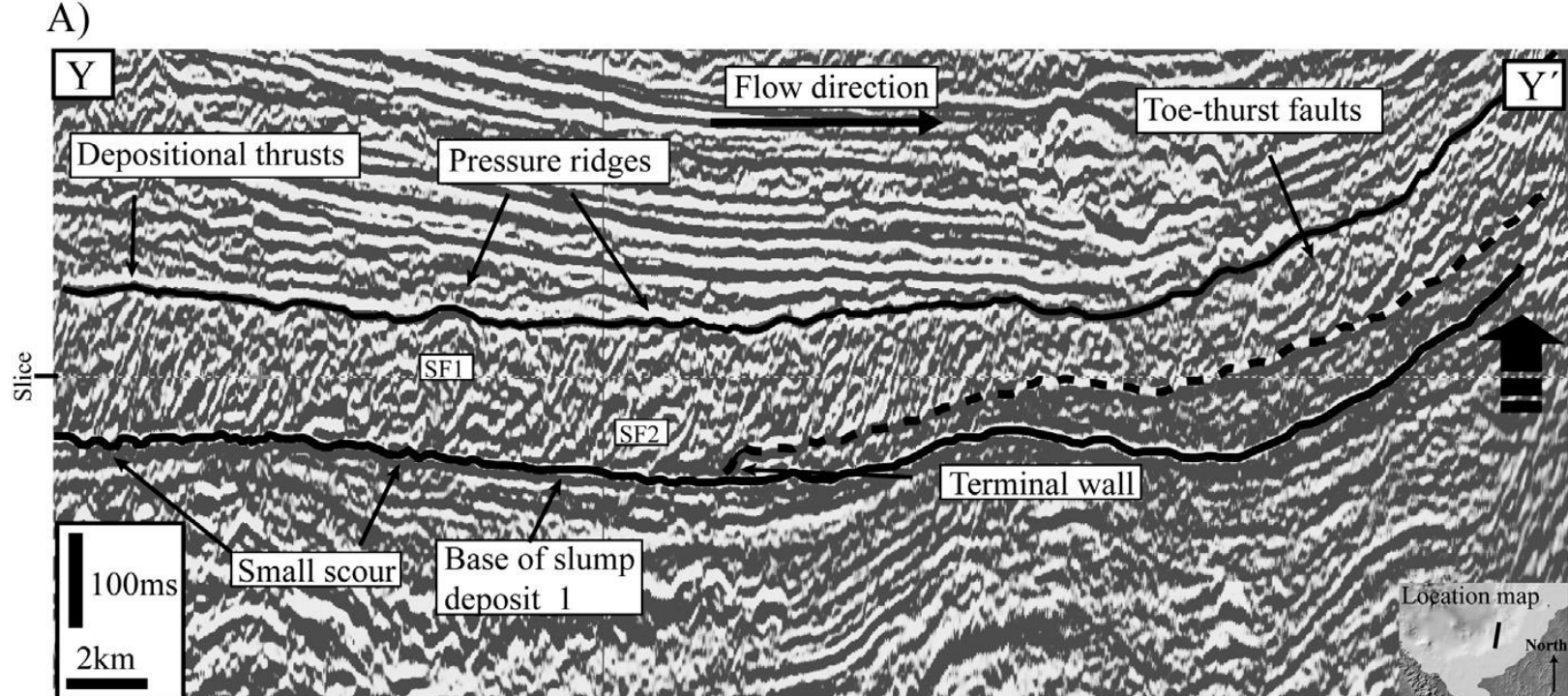
Фрагмент сейсмического профиля для блока «Т» в дельте Нигера. А – вероятная толща отложений транспорта масс. Так как она выклинивается вверх по склону, то вероятно она формировалась в эпоху низкого стояния моря, для которой типично формирование обломочных потоков на склоне.

Б – горизонт с крупными телами оползневого потока, наклонные рефлексоры могут быть взбросами в нижней части склона с нагромождением оползших тел.

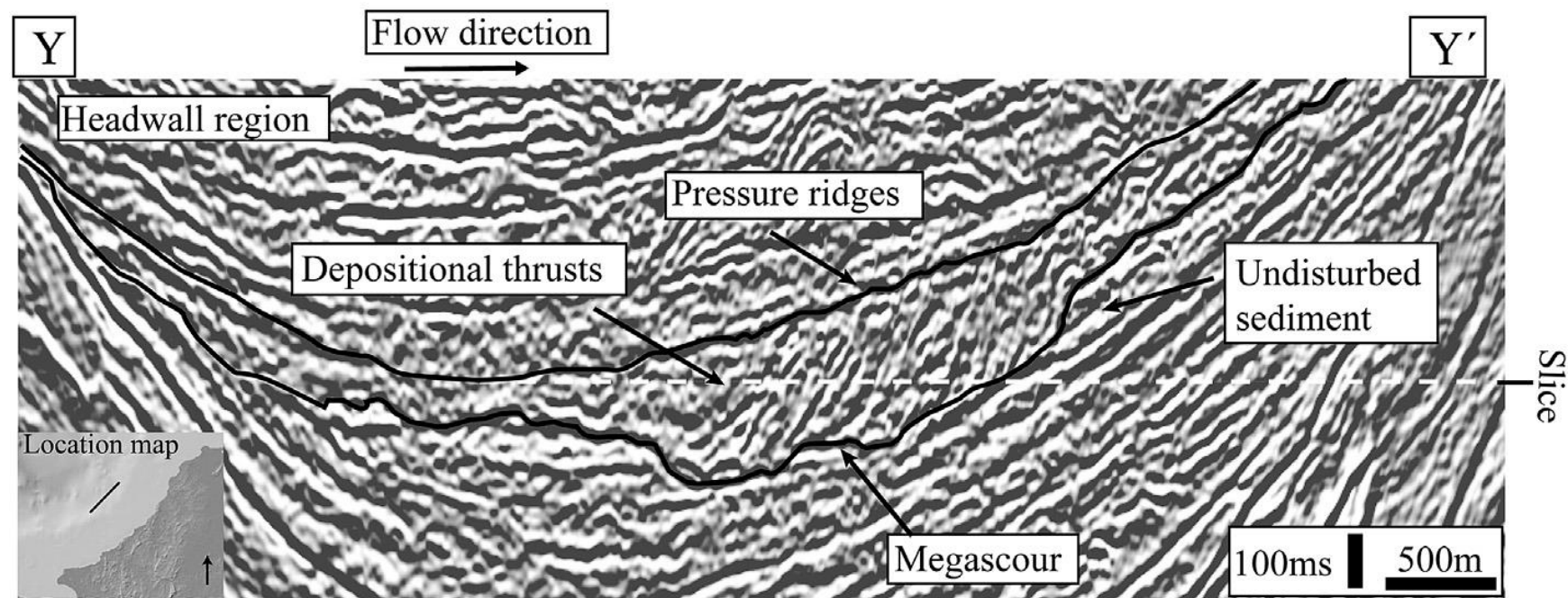
III. Обломочные потоки (mass transport deposits MTD) :



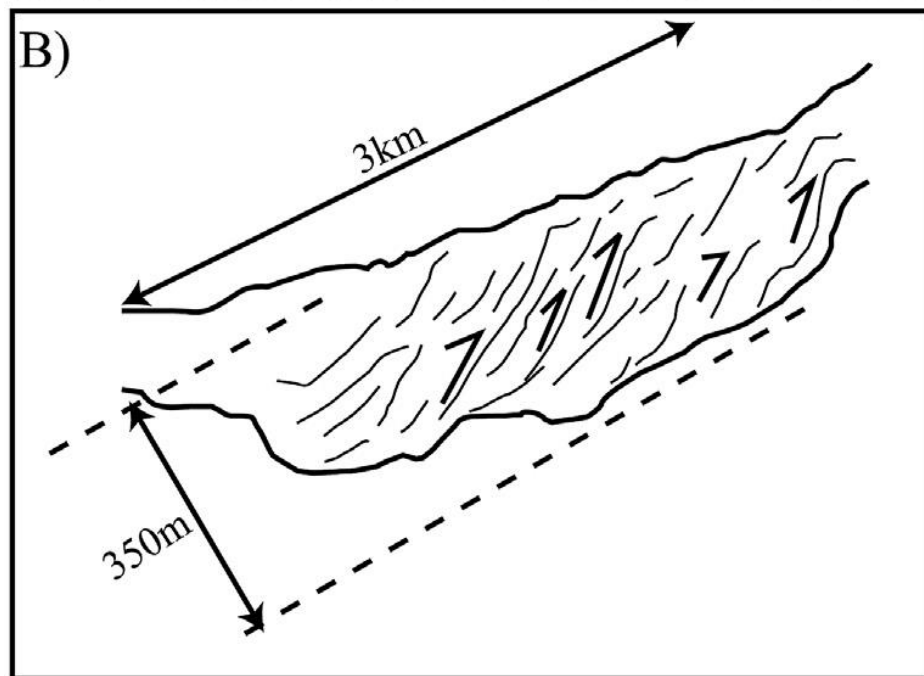
twf, ms

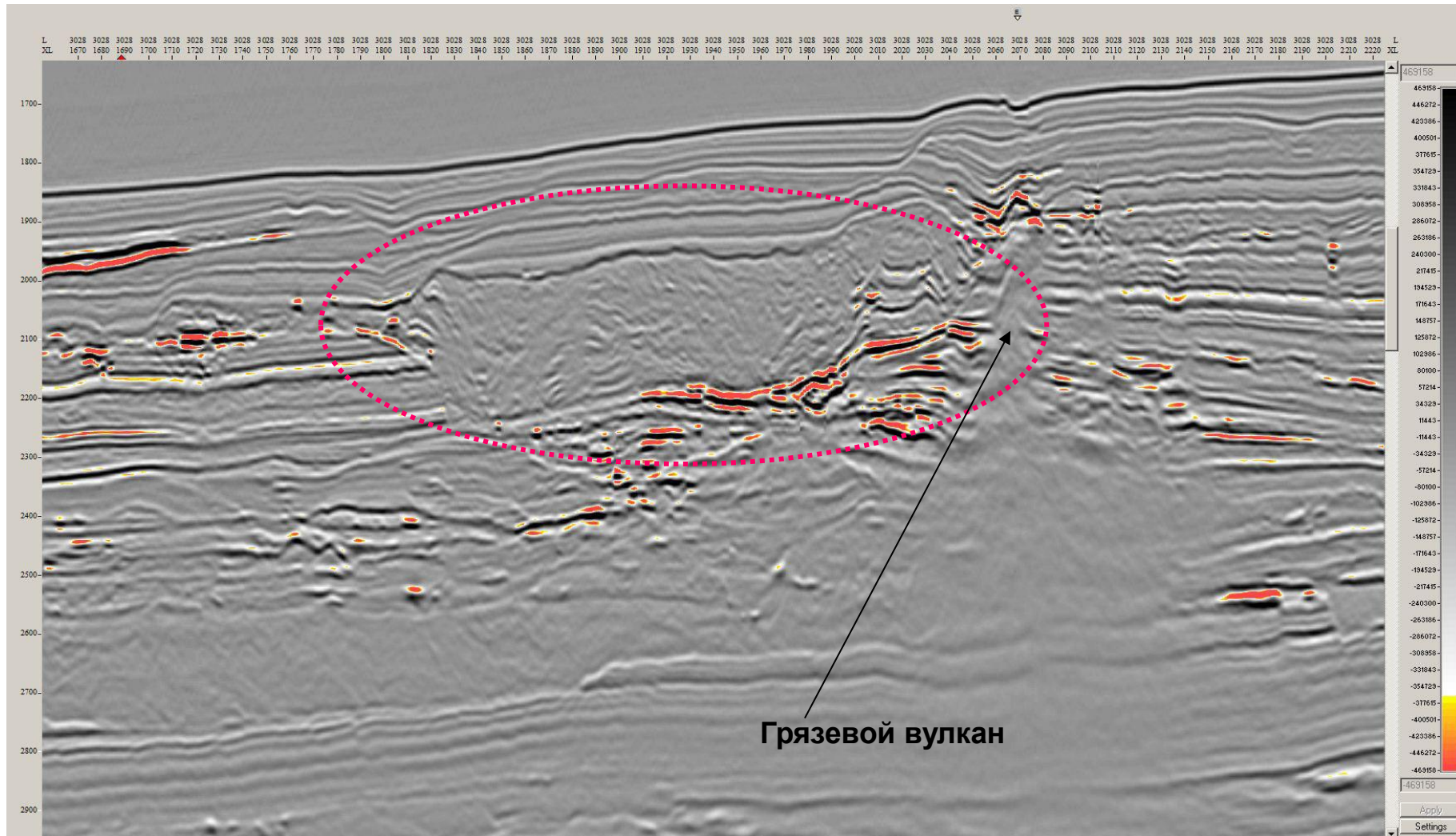


A)



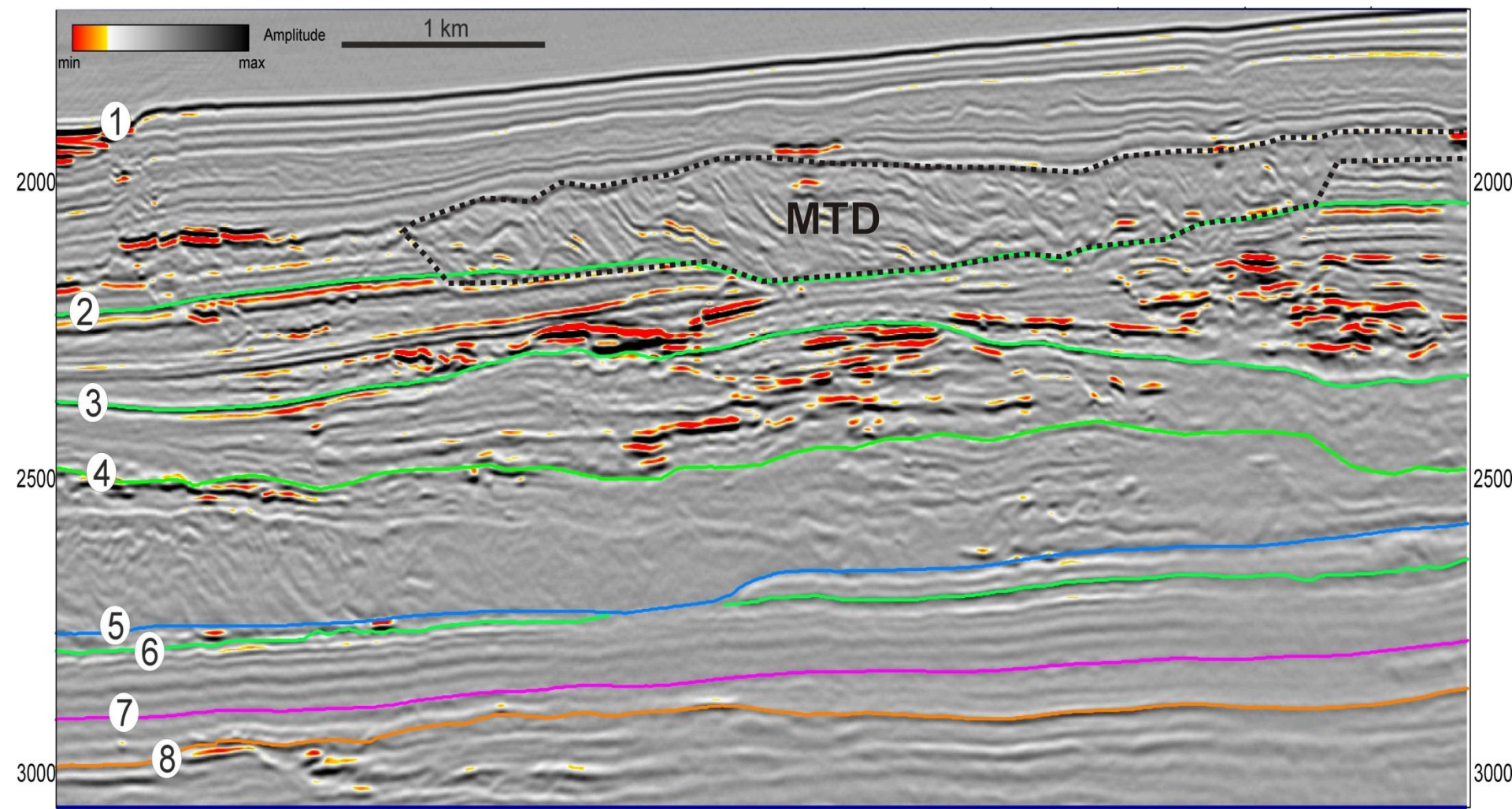
B)

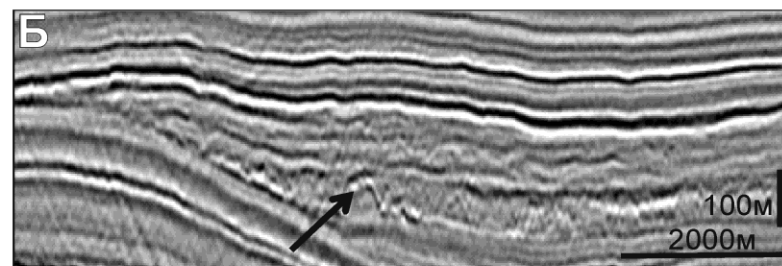
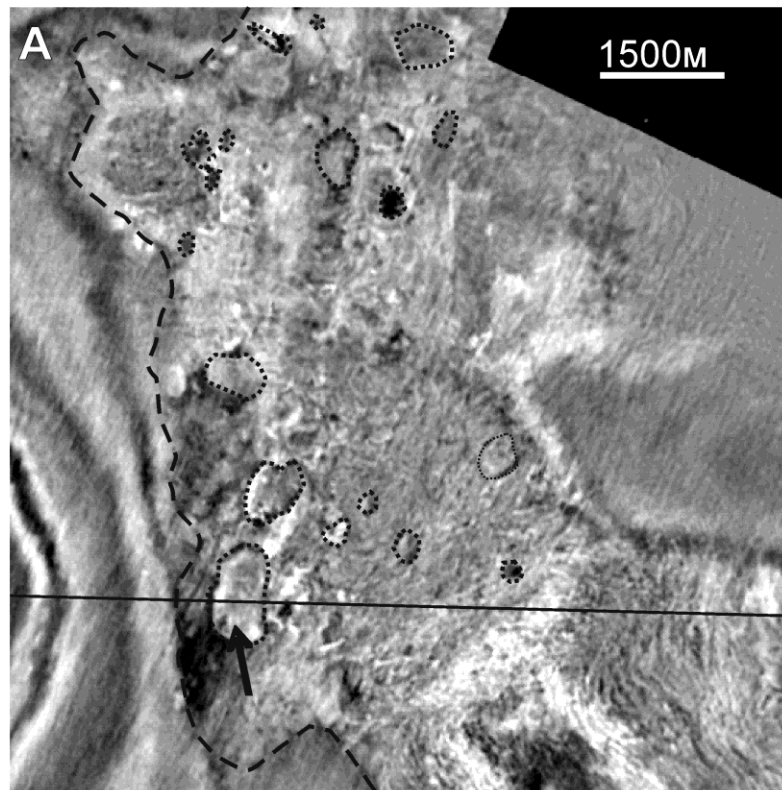




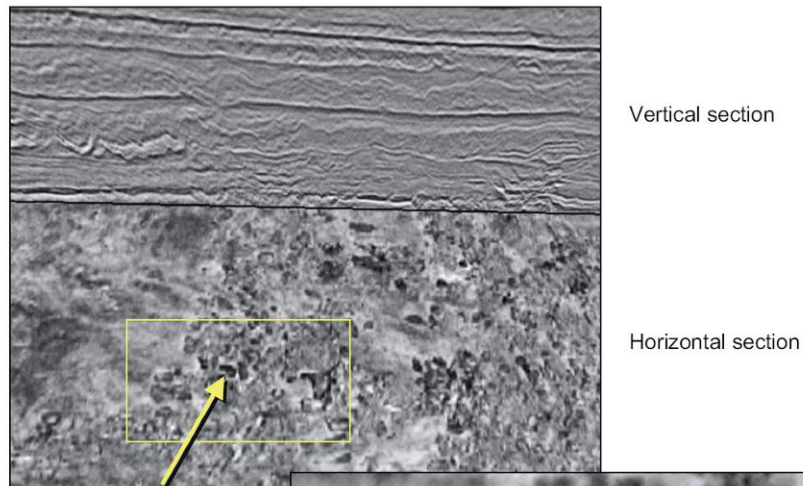
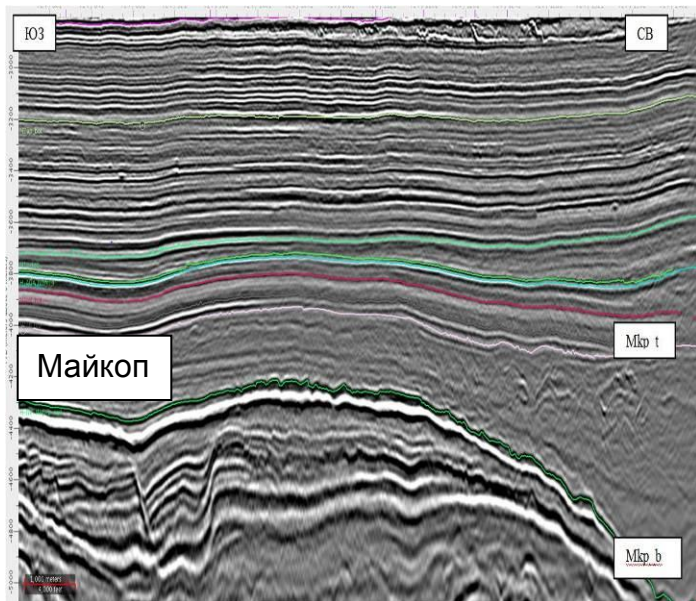
Фрагмент сейсмического профиля для блока «Т» в дельте Нигера. Хорошо виден горизонт, вероятно, представленный оползневыми потоками (осадками транспорта масс). Правее наблюдается тело типа захороненного грязевого вулкана

А.М. Никишин, В. Никитина

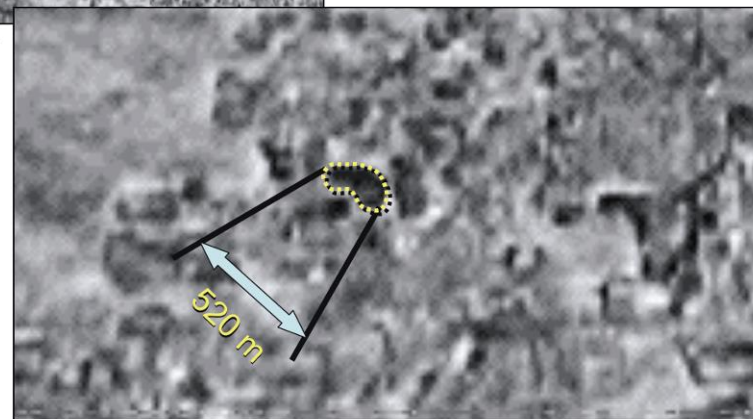




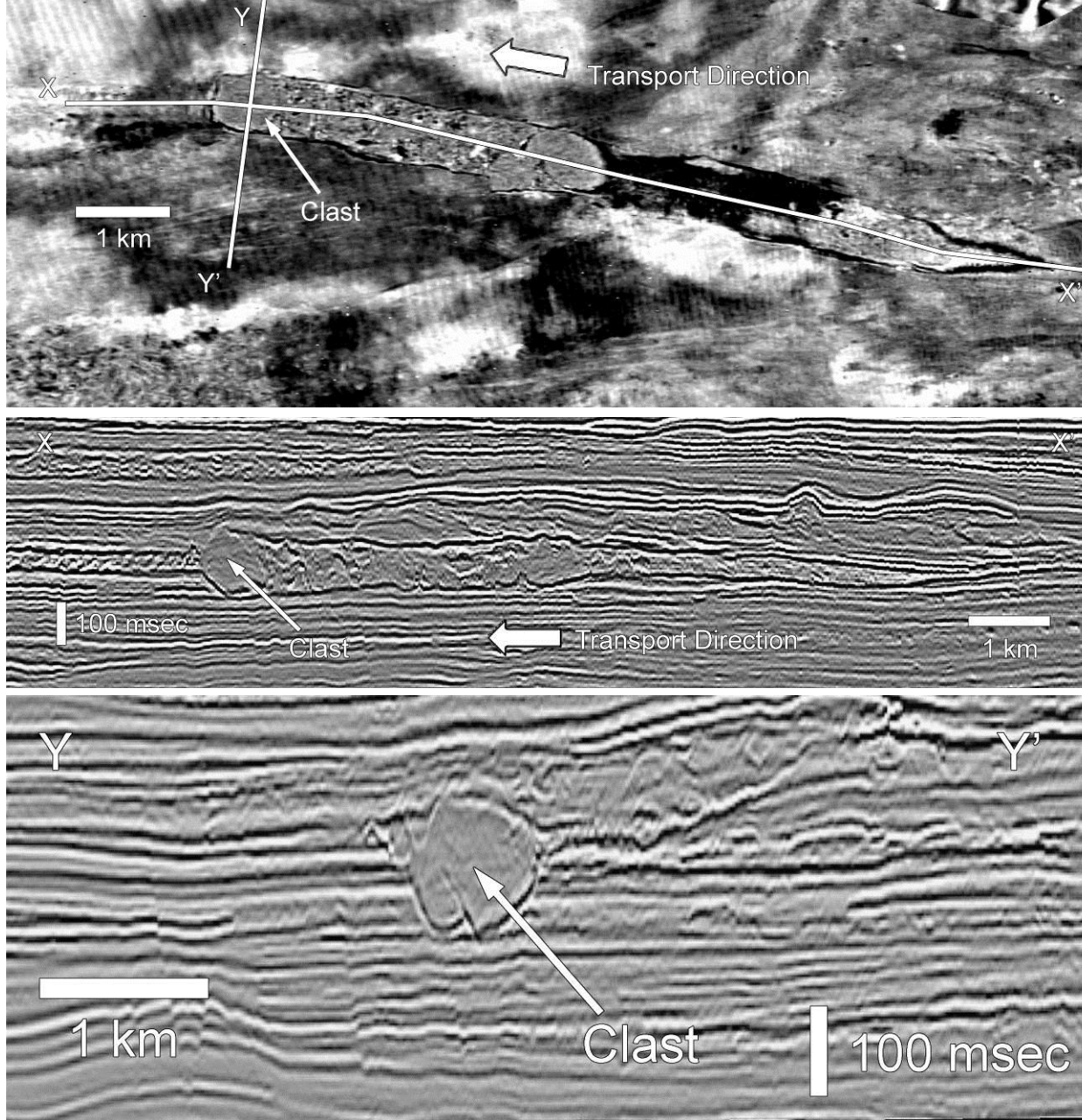
Слайс по сейсмическому кубу для склона вала Шатского в Черном море (А) и сейсмический разрез к нему (Б). На рисунке А пунктиром оконтурены отдельные вероятные олистолитовые тела. Стрелкой показано одно и тоже тело на слайсе и разрезе (Митюков и др., 2012)



Debris "Clasts" Near Top of Mass Transport Complex



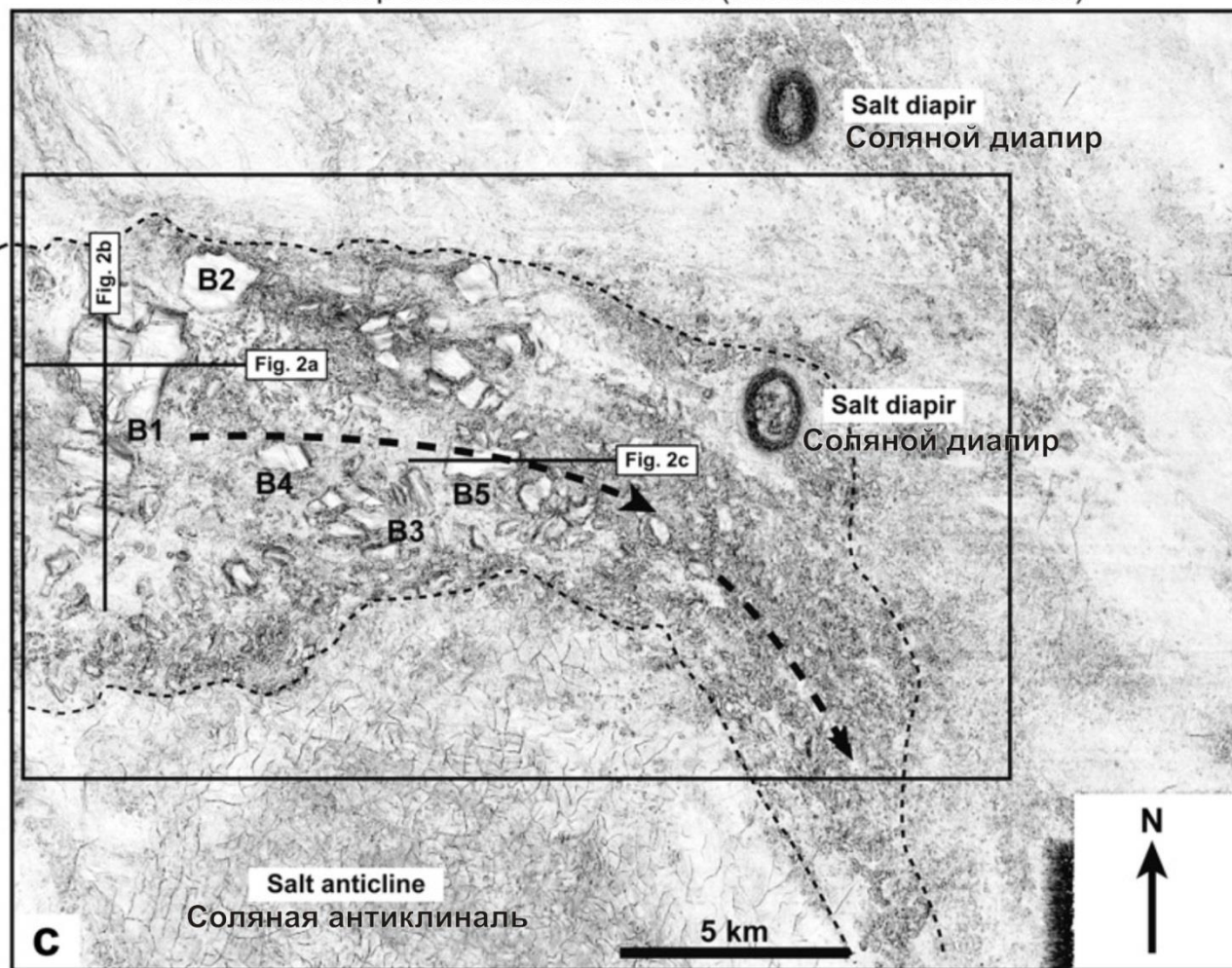
Сейсмический временной слайс и разрез к нему, показывающий отложения транспорта масс с мегакластом (олистолитом) шириной более 500 метров (Posamentier, 2006).



Сейсмический временной слайс, показывающий отложения транспорта масс с мегакластом (олистолитом) длиной около 4 км и разрезы вдоль и поперек олистолита (Posamentier, 2006).

Карта когерентности (324 мсек ниже дна моря)
 Coherence map of the studied landslide (324ms below the seafloor)

Предполагаемый эскарп отрыва на западе
 inferred headwall scarp to the west



Alves, Cartwright, 2010

Слайс для отложений слампа

E. Alfaro, M. Holz / Marine and Petroleum Geology 57 (2014) 294–311

303

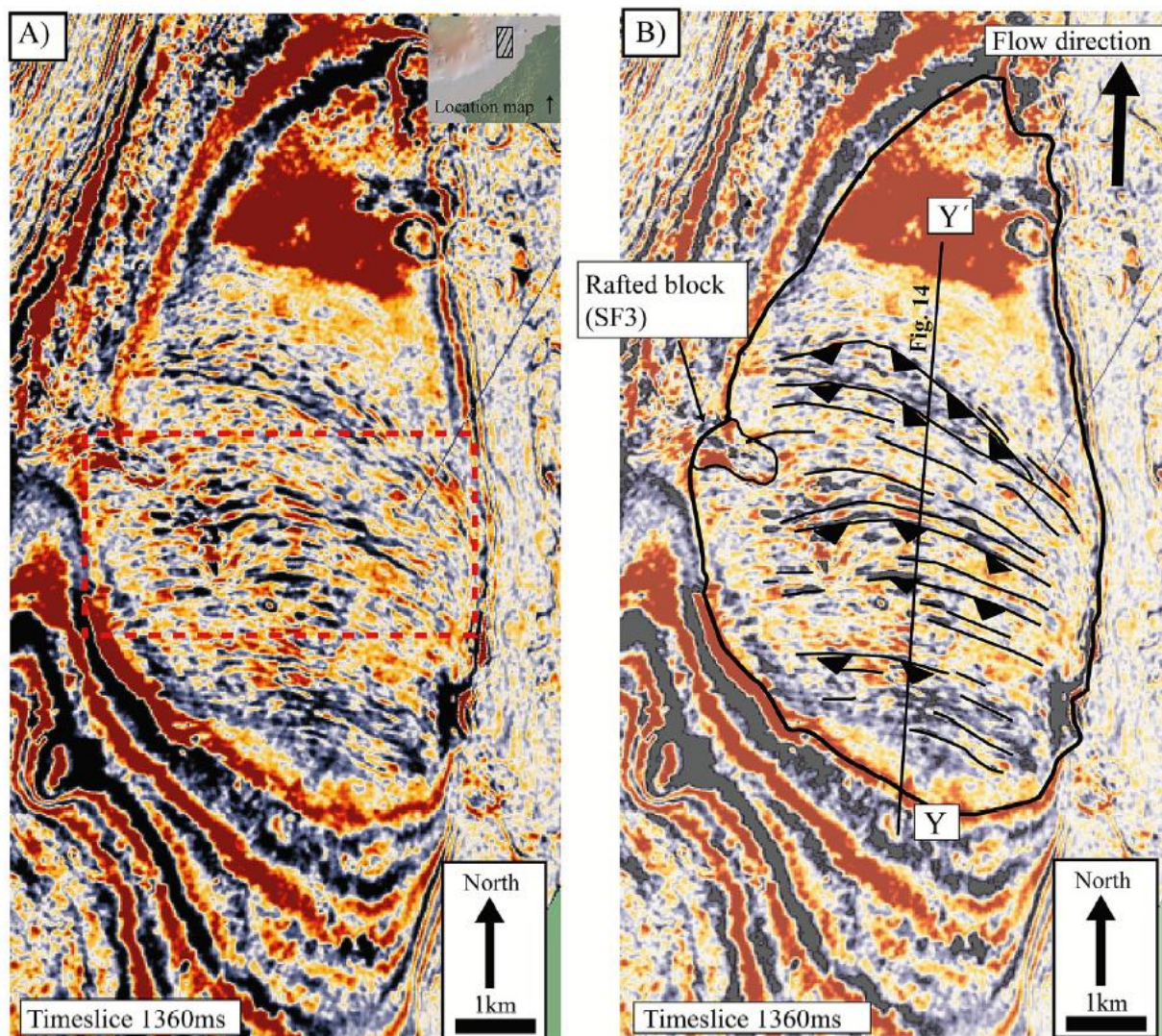


Figure 12. Slump deposit_4 shown by timeslice 1360 ms. A) Uninterpreted timeslice. B) Slump deposit_4 with an elongate lobate morphology, smoothed and slightly wavy boundaries and low-amplitude, low continuity reflections with some scattered high-amplitude and high continuity reflections. Location of seismic profile YY'.

Слайс для отложений дебритов

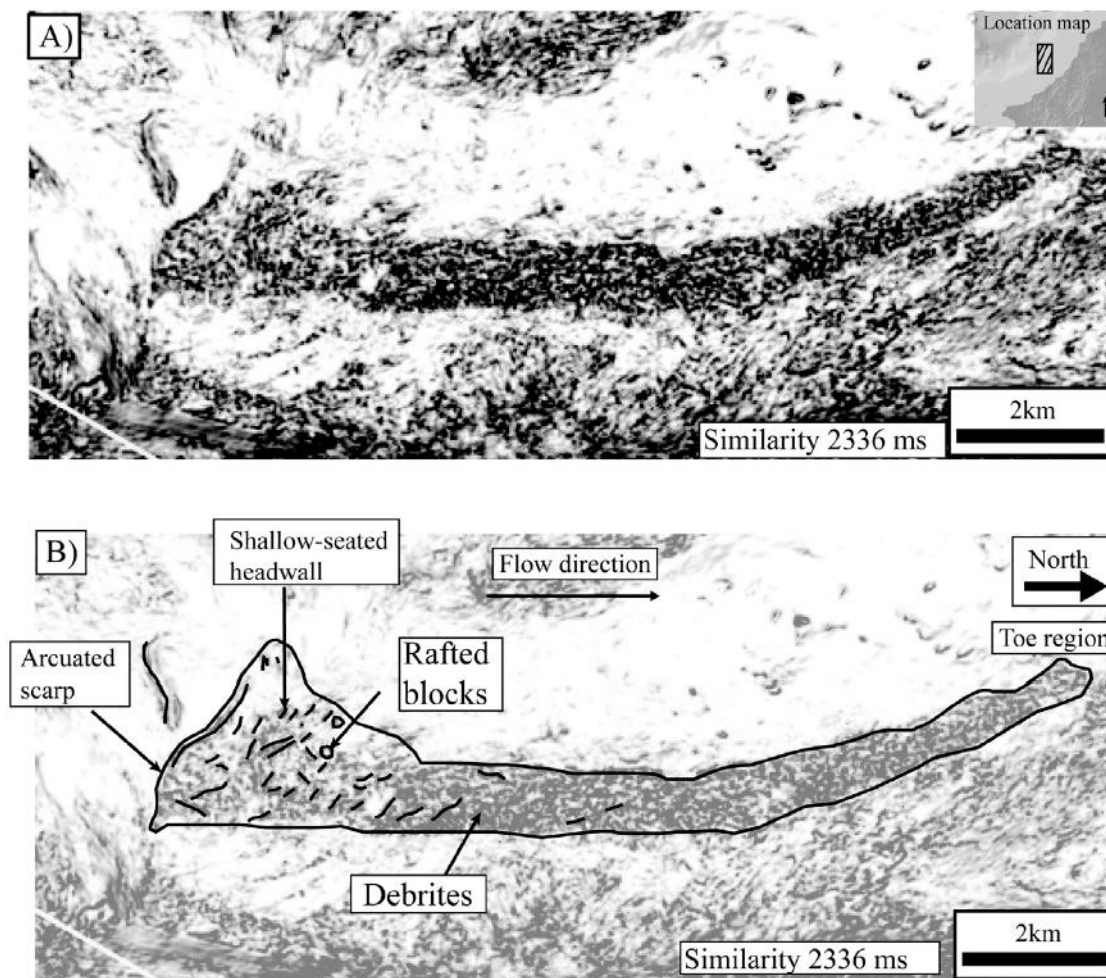


Figure 16. Debrites as shown by similarity attribute near to 2336 ms. A) Uninterpreted similarity timeslice. B) Rafted blocks correspond with coherent blocks embedded in a chaotic matrix. Shallow-seated headwall delimited by arcuated lineaments.

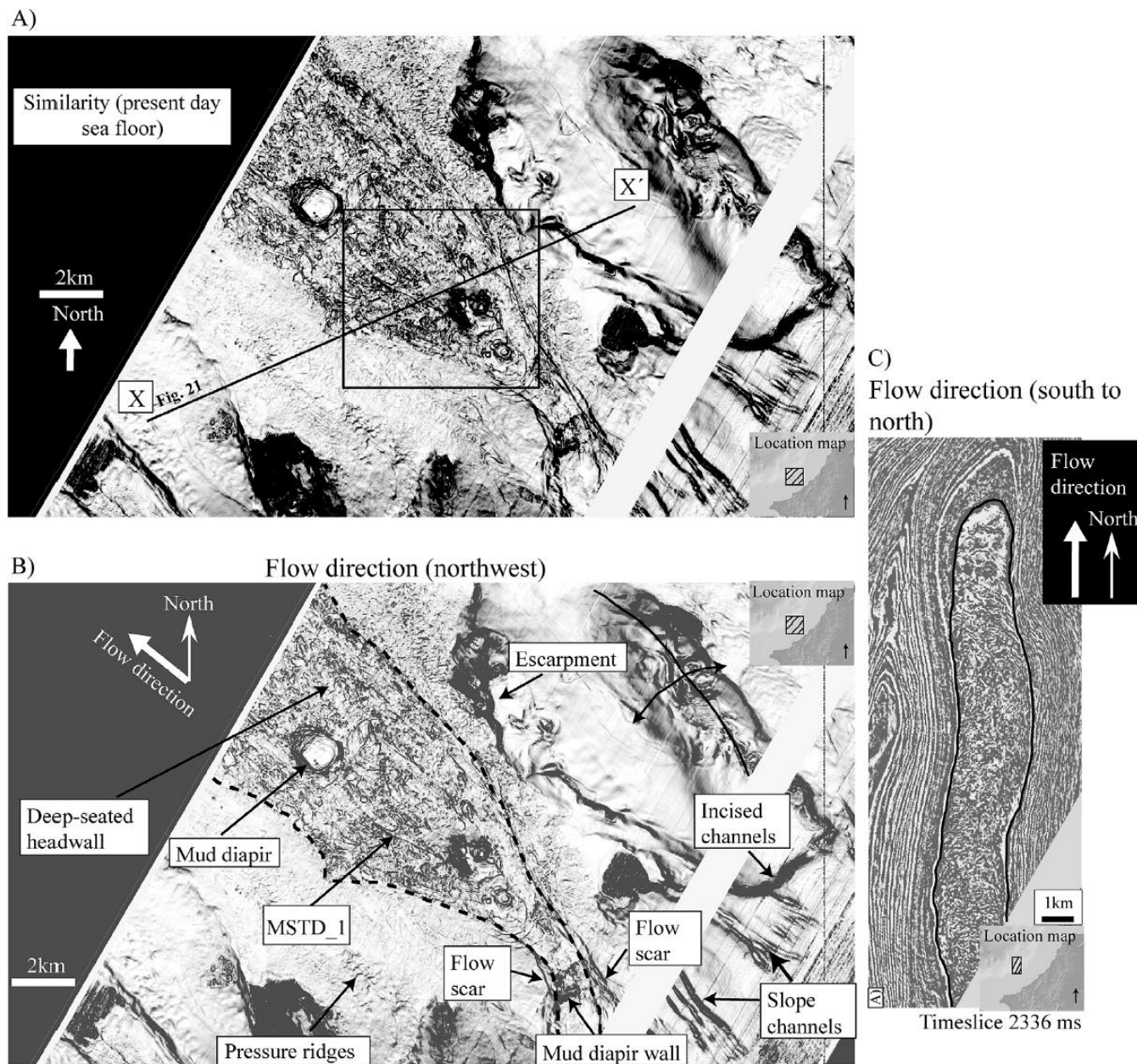
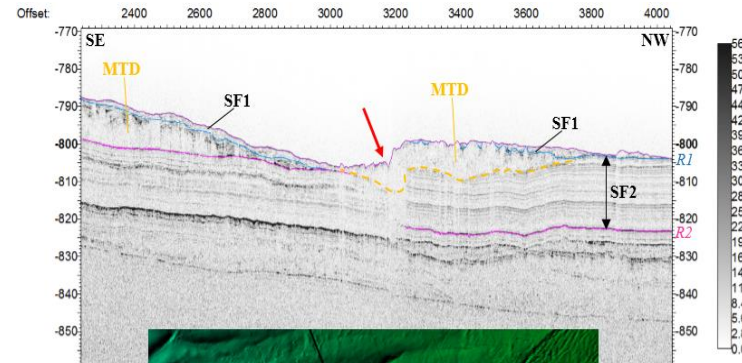
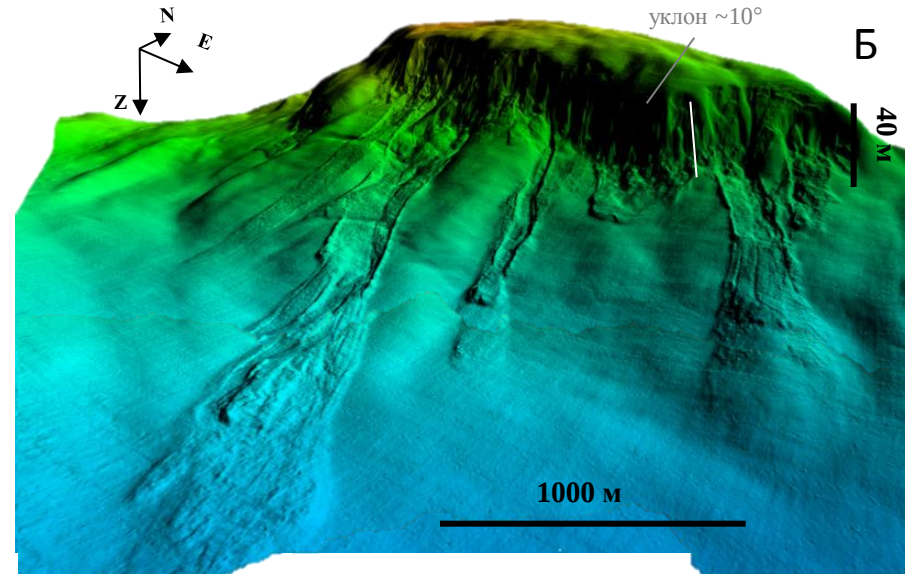
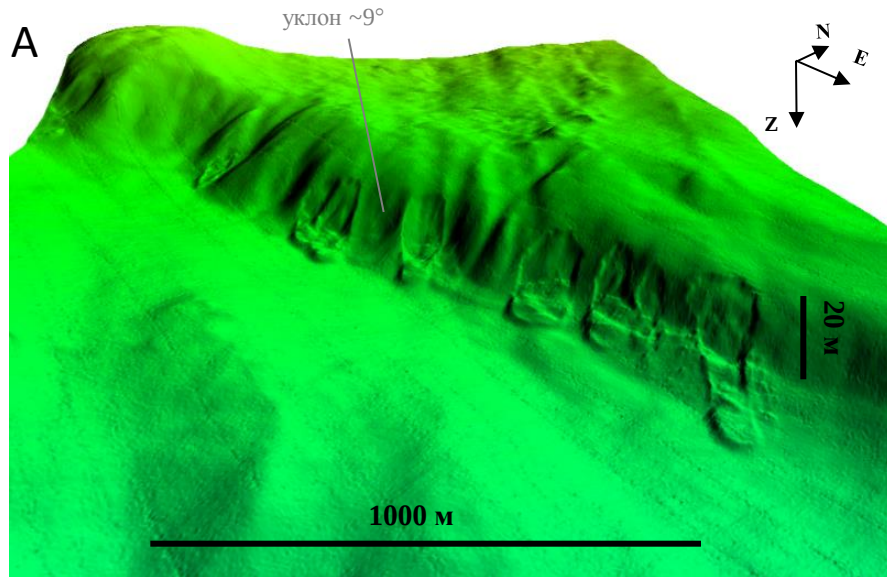
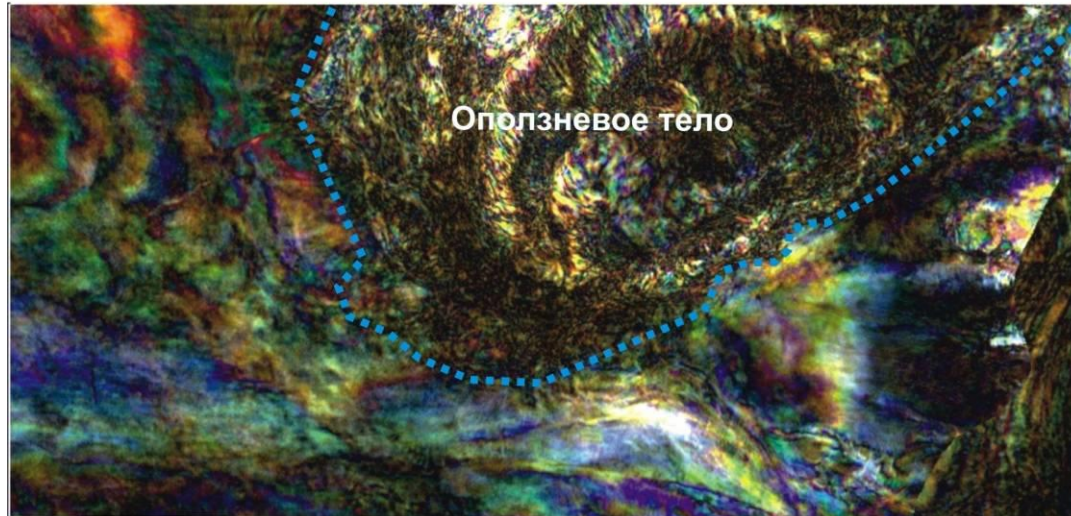
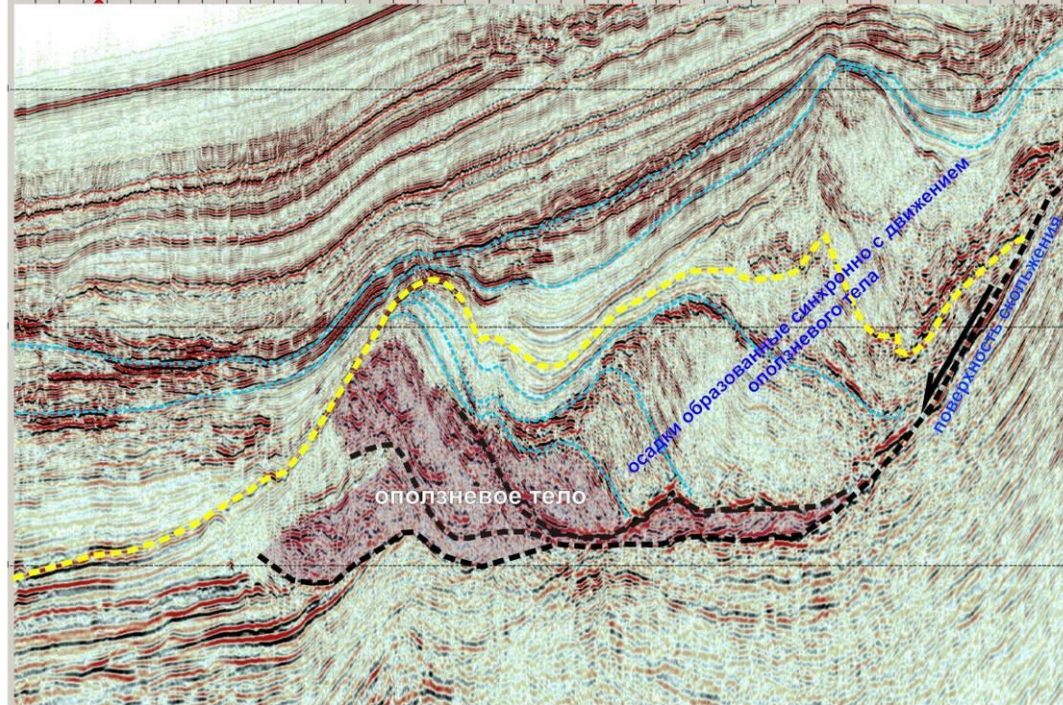


Figure 19. Similarity in sea floor. A) Uninterpreted similarity showing location of profile XX' and Figure 20 in black square. B) Mixed slumps-turbidites-debris_1 (MSTD_1) and associated structures and depositional elements. This deposit suggests a flow direction to northwest. C) Slumps in timeslice 2336 ms showing a flow direction from south to north.

Турецкий сектор Черного моря. Подводно-склоновые процессы

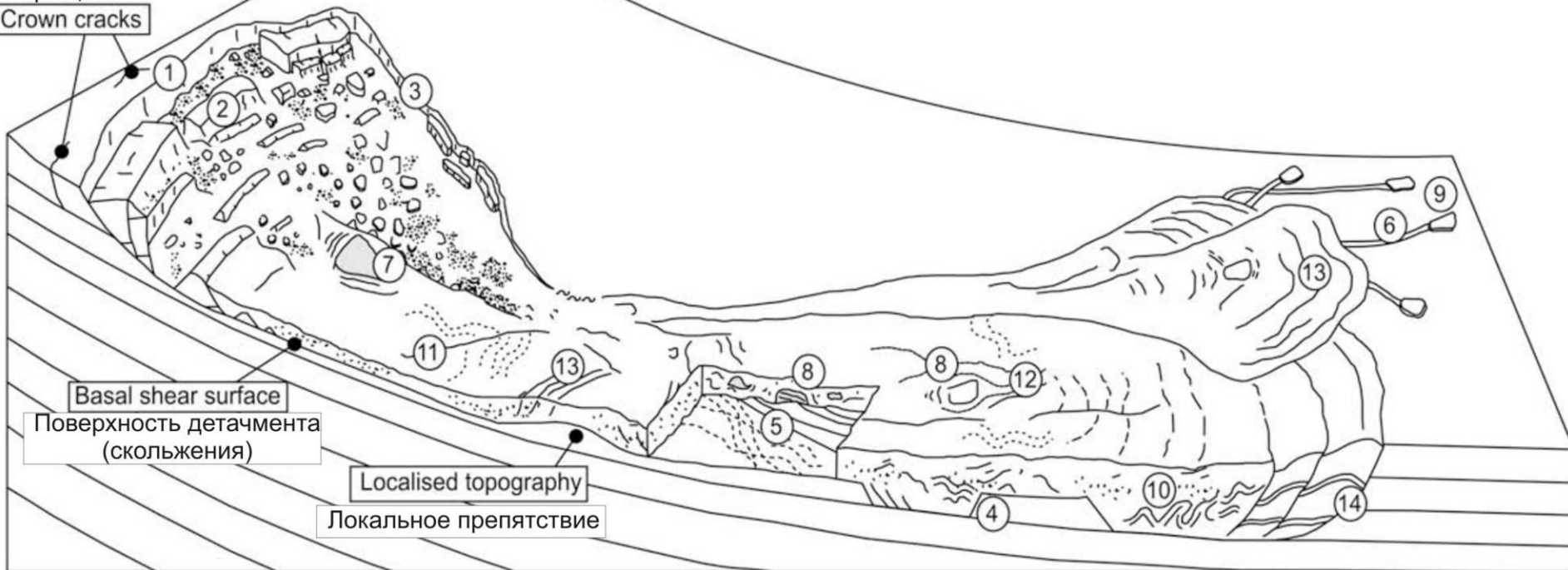




Вид на разрезе и сейсмическом слайсе оползневого тела Понгуе. Континентальная окраина Экваториальной Гвинеи, блок

Формирующиеся
трещины

Crown cracks



Basal shear surface

Поверхность детачмента
(скольжения)

Localised topography

Локальное препятствие



Headwall
Domain
Верхняя часть

Translational Domain
Область перемещения

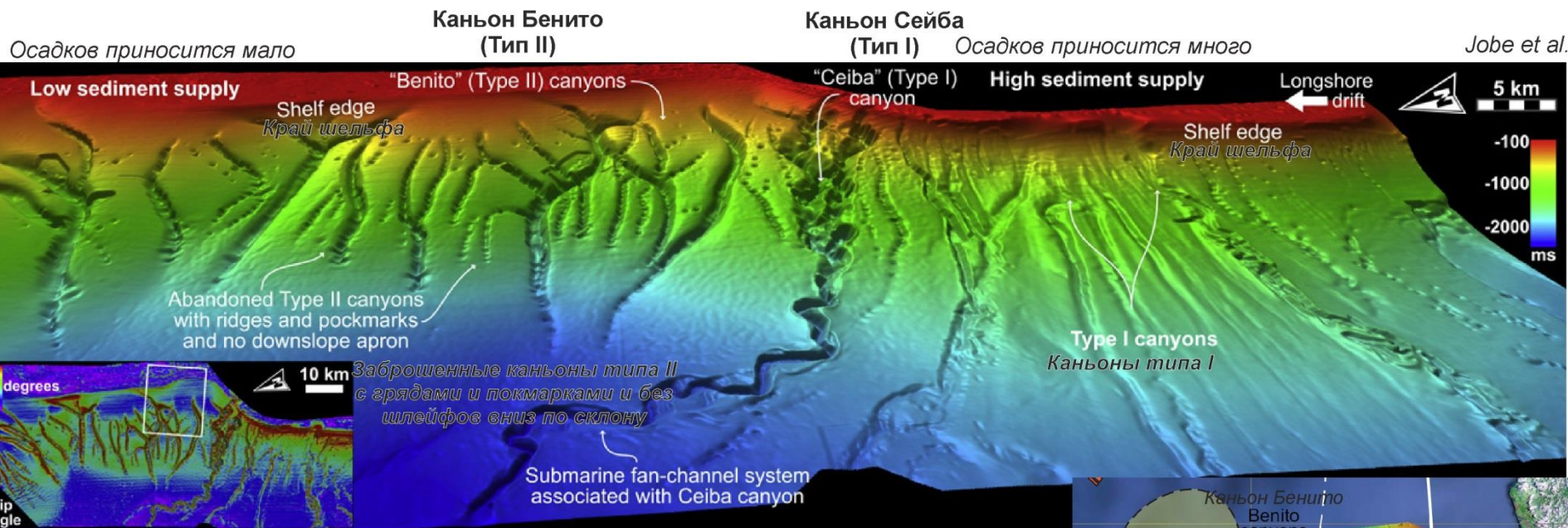


Toe Domain
Фронтальная часть

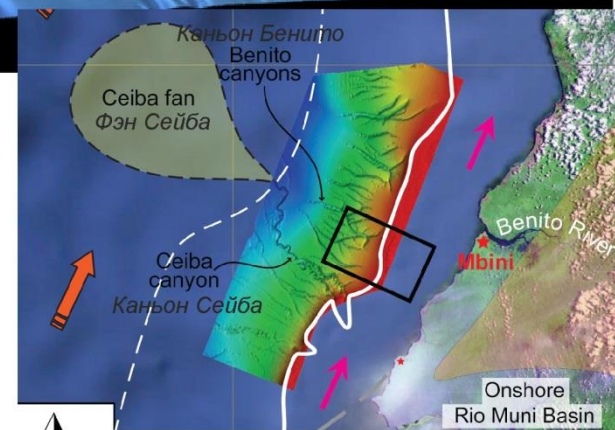
. Модель формирования осадков транспорта масс (mass transport complex) (Bull et al., 2009).

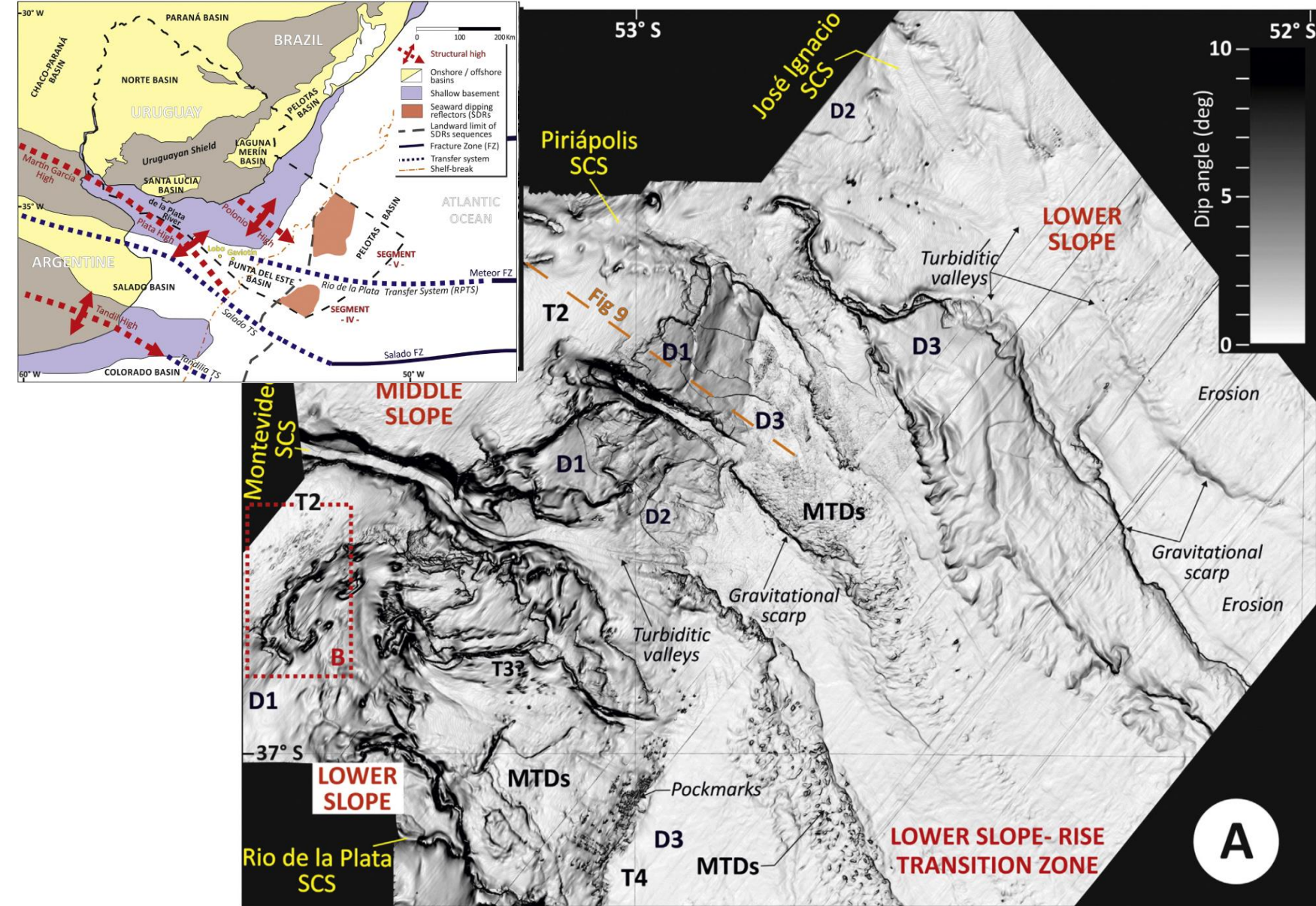
- 1 – верхний уступ (эскарп) отрыва, 2 – блоки образовавшиеся в процессах растяжения,
- 3 – боковые границы, 4 – рампы и флэты поверхности детачмена (скольжения),
- 5 – борозды вдоль поверхности скольжения, 6 – борозды созданные движением кластов (олистолитов),
- 7 – остаточные не перемещенные блоки, 8 – перемещенные блоки (класты, олистолиты),
- 9 – олистолиты (класты) во фронтальной часть, 10 – складки, 11 – отдельные крупные продольные сдвиги,
- 12 – структуры течения, 13 – гряды-складки в зоне торможения потока, 14 – складчато-взбросовая зона

Канальные системы



Подводная канально-фэновая система, связанная с каньоном Сейба





F.J. Hernández-Molina et al. / Marine Geology xxx (2015) xxx–xxx

Fig. 5. A) Dip magnitude of the present-day seafloor based on 3D seismic data, showing themorphology. Location in Figs. 1 and 4. B) Detail of the highlighted area illustrating deformed pockmarks and scour/dune field related to the re-circulated (southward flowing) AAIW (R-AAIW) and Upper Circumpolar DeepWater (UCDW) circulation (courtesy of BG Group). Main submarine canyons-systems (SCS); drift deposits (D1, D2 and D3); contourite terraces (T2 and T4) and mass-transport deposits (MTDs) is indicated.

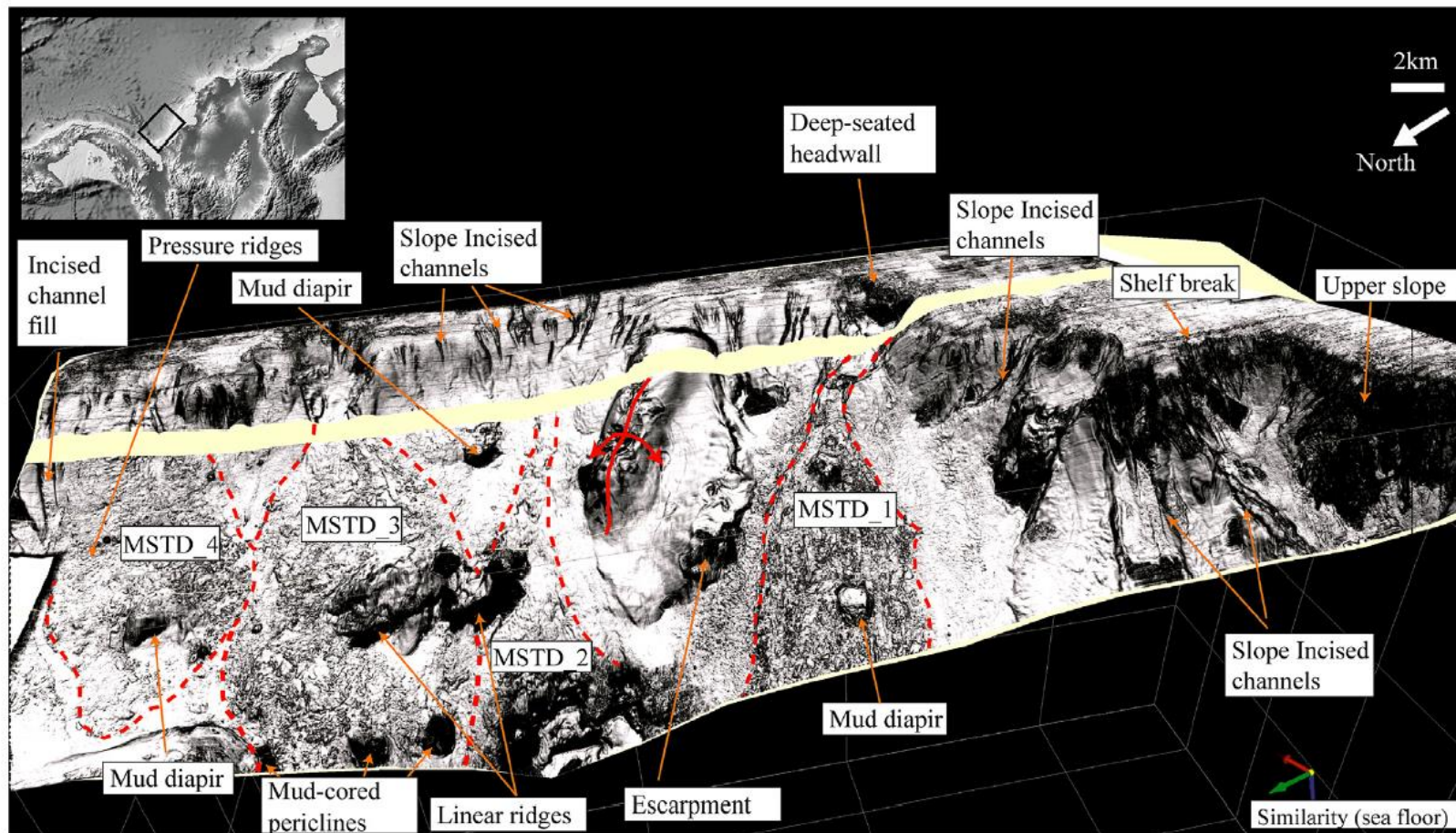
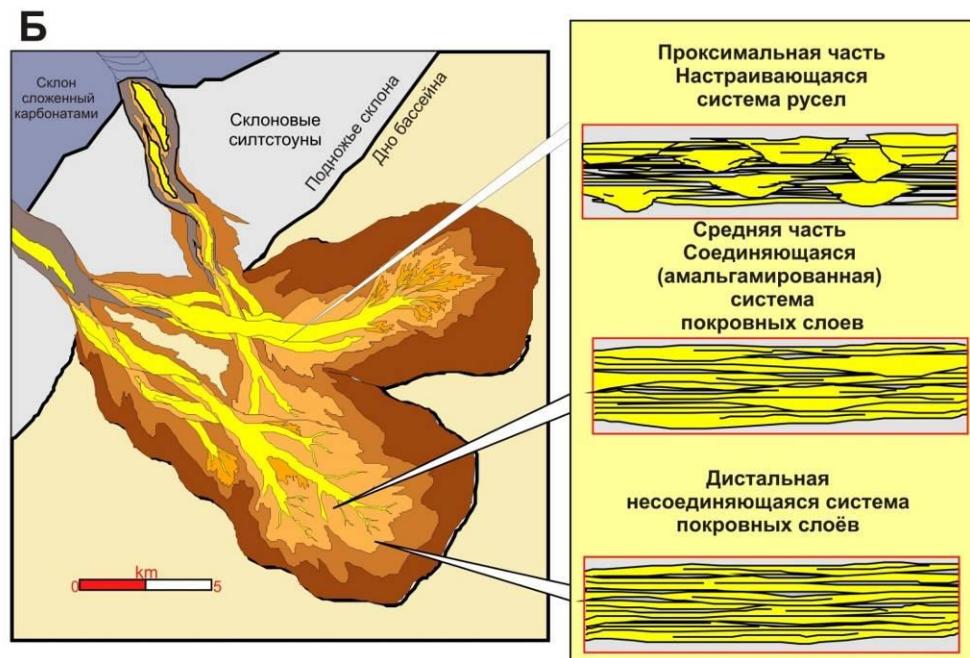
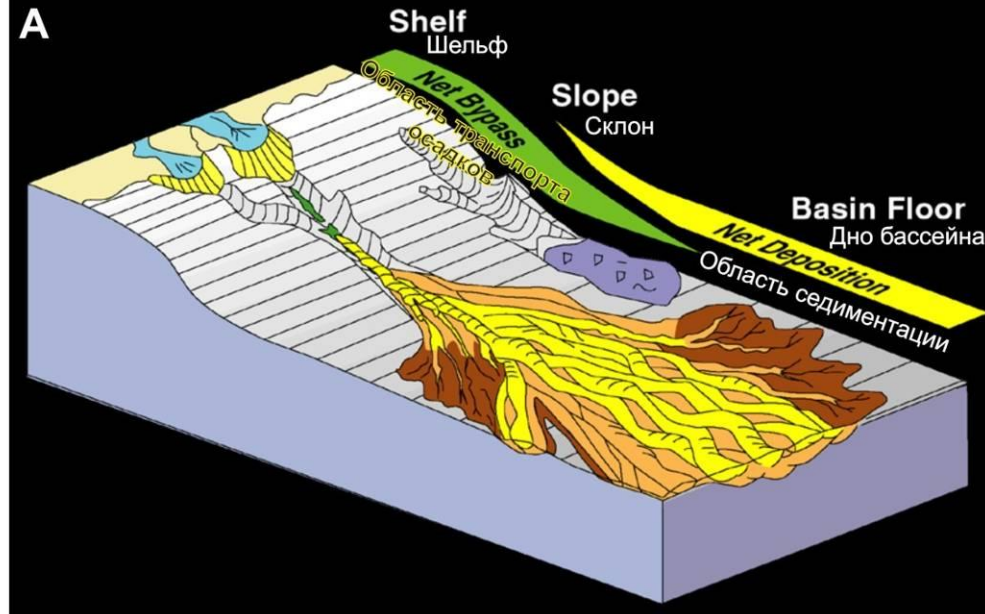
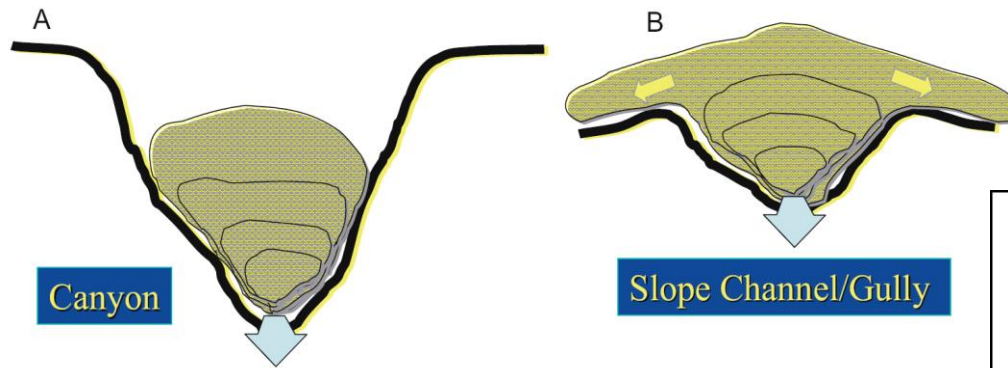


Figure 18. Seismic geomorphology interpretation from application of similarity attribute in the sea floor. Diverse depositional elements and structures composed of incised channels, four lobate mixed slumps-turbidites-debrites, pressure ridges, escarpments, linear ridges, and mud-cored periclines associated to a slope basin. Mixed slumps-turbidites-debrites are connected to feeder channels, are broadly spreaded and slightly affected by structures suggesting an unconfined setting. Transport direction is toward northwest.

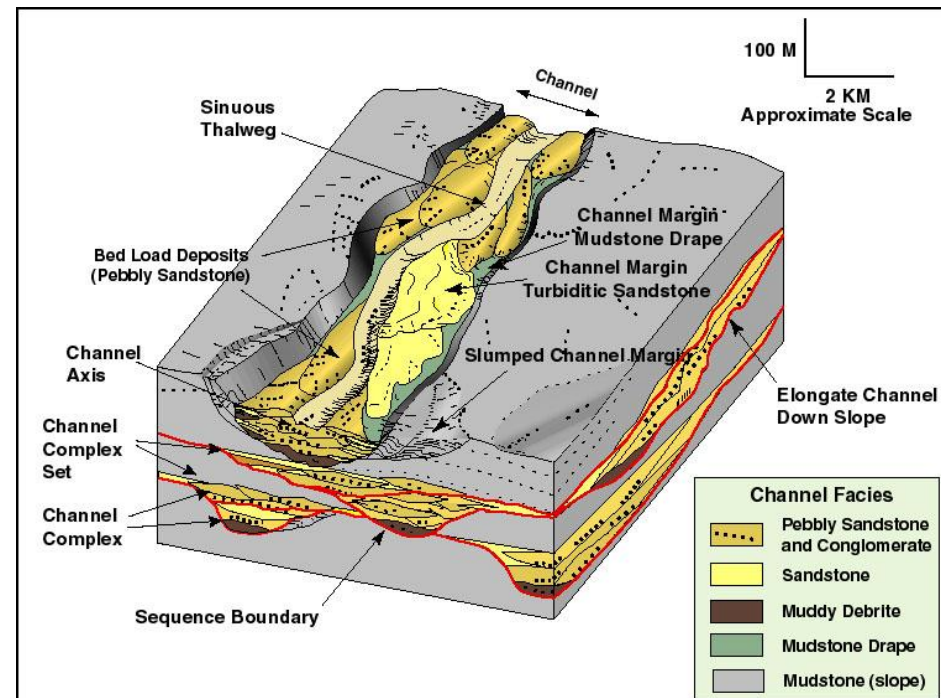


А. Общая модель канальной системы на континентальном склоне.

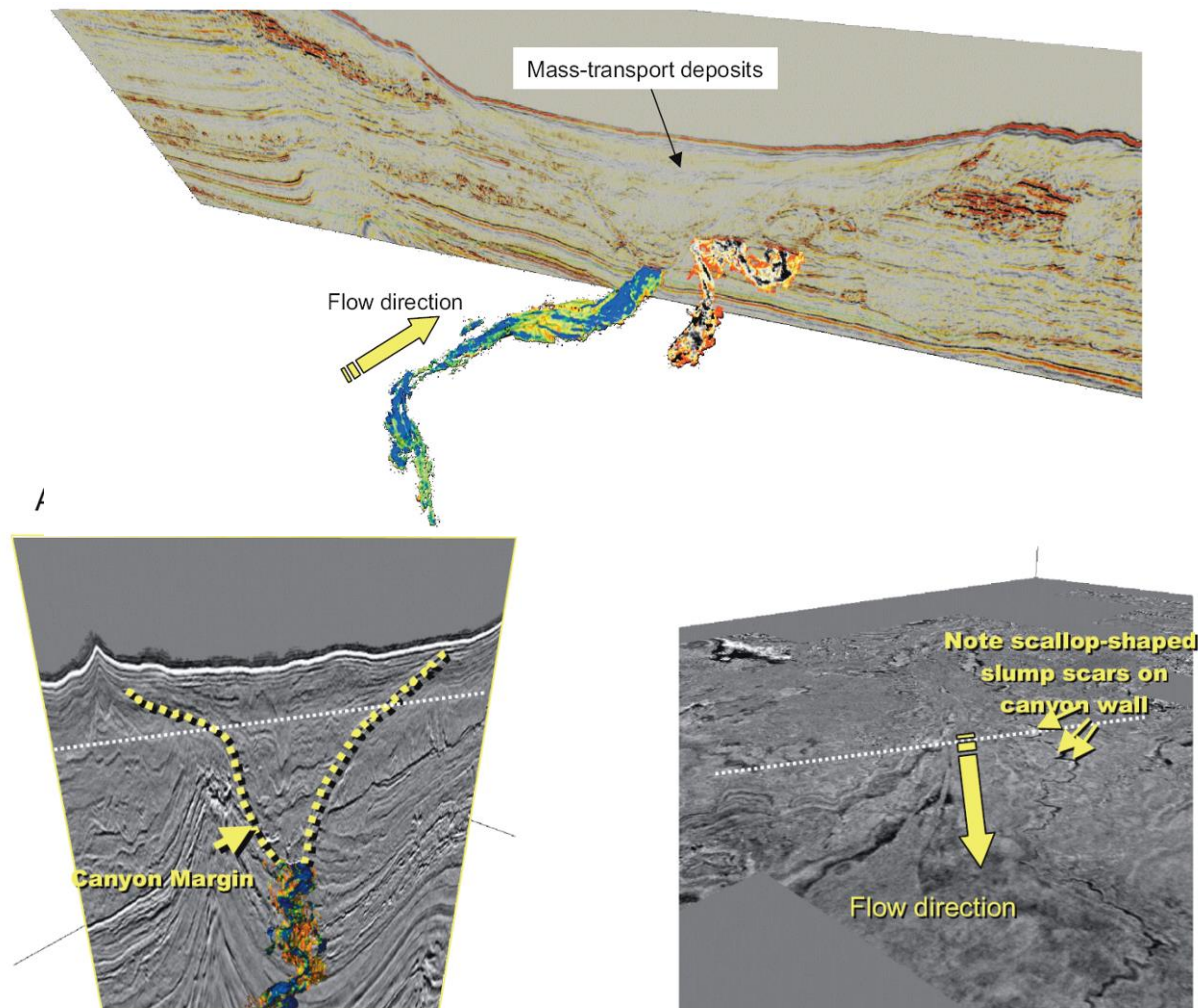
А. Модифицировано по N. Jones. Б. Модифицировано по Beaubouef et al., 1999.



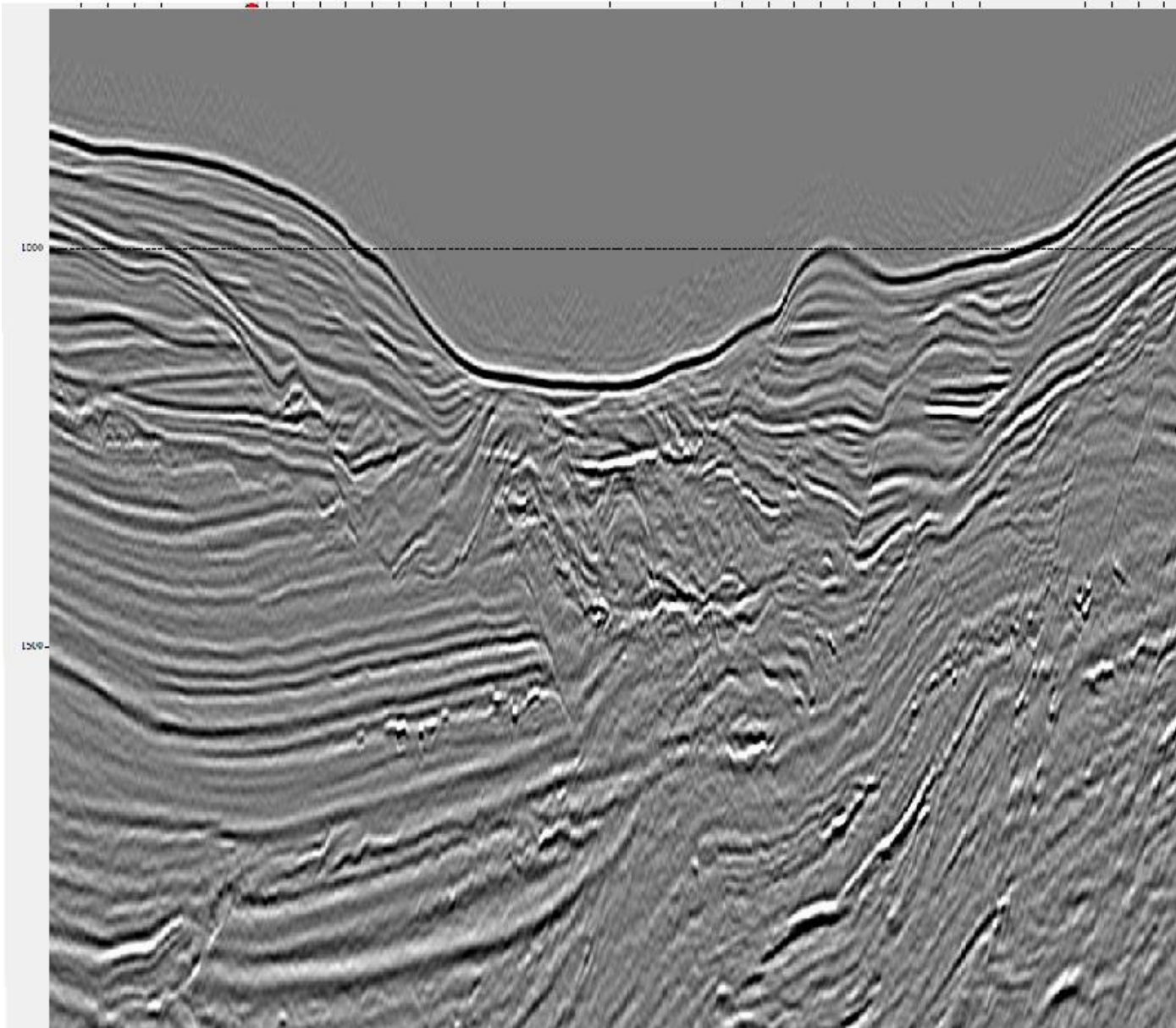
Схематические разрезy через каньон (A) и склоновый канал (B). Осадочные процессы в каньоне целиком ограничены его стенами, осадки левы не образуются вокруг каньона. Наоборот, в каналах осадки не ограничены его стенами и осадки типа левы наблюдаются вокруг канала (Posamentier, Walker, 2006).



Пример характера седиментации в каньоне (или ограниченного канала)

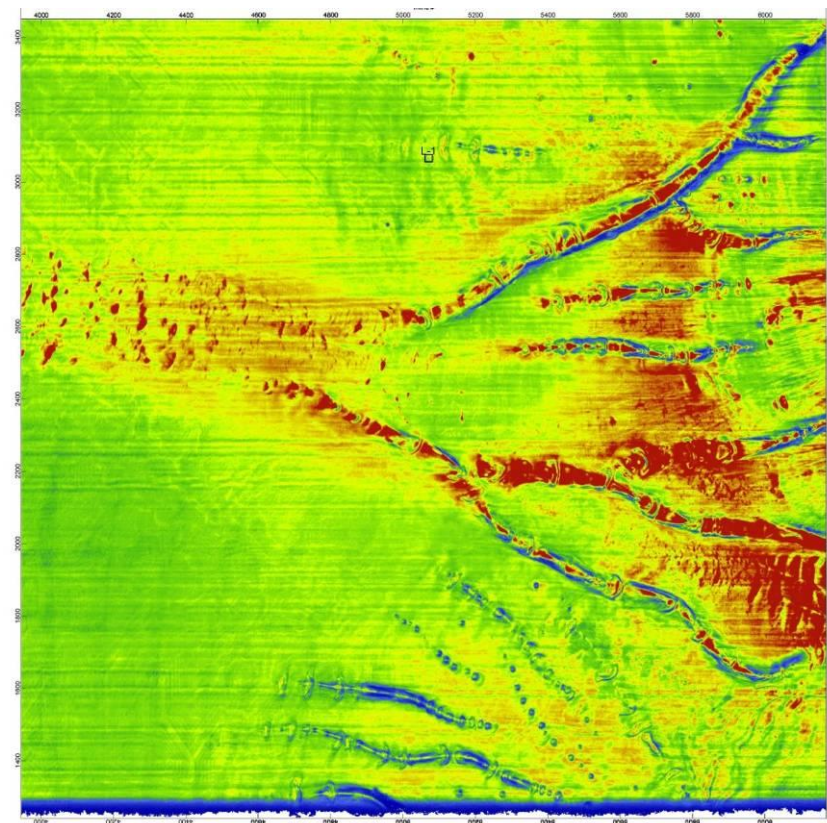
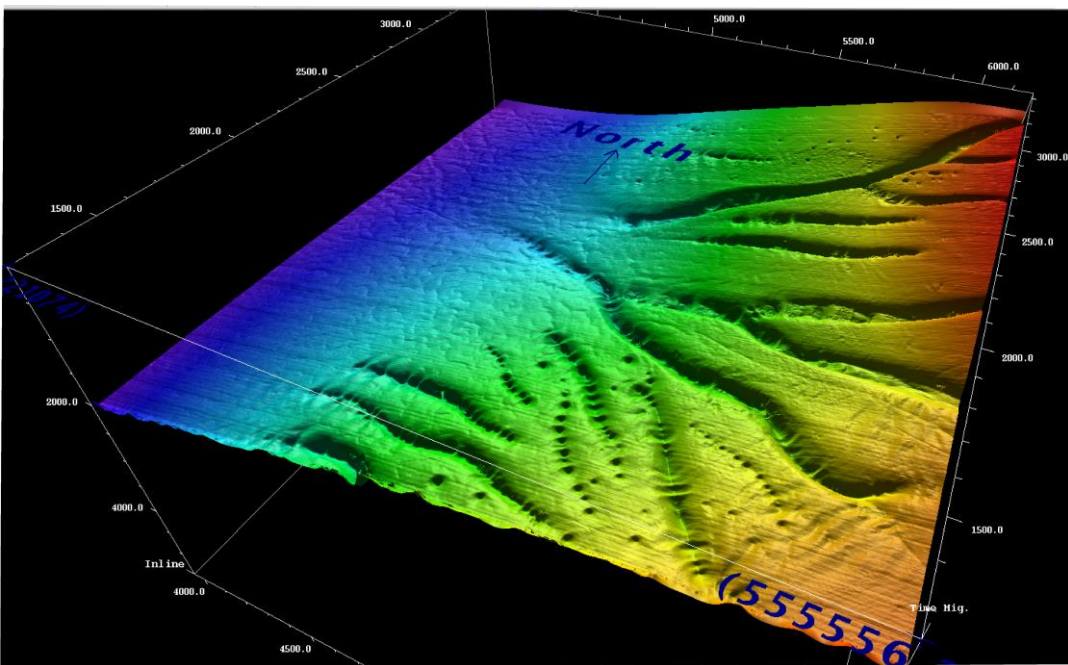


Каньон Миссисипи. Вверху показан разрез через современный каньон. Основная часть каньона заполнена отложениями транспорта масс, а в его основании выделяется умеренно меандрирующий турбидитовый канал (русло). Внизу показан разрез через тот же каньон и слайс к нему. Для турбидитового канала в основании каньона характерно заполнение турбидитовыми песчаниками. На слое видно, что для краёв каньона типично образование слампов (оползневых потоков) (Posamentier, Walker, 2006)

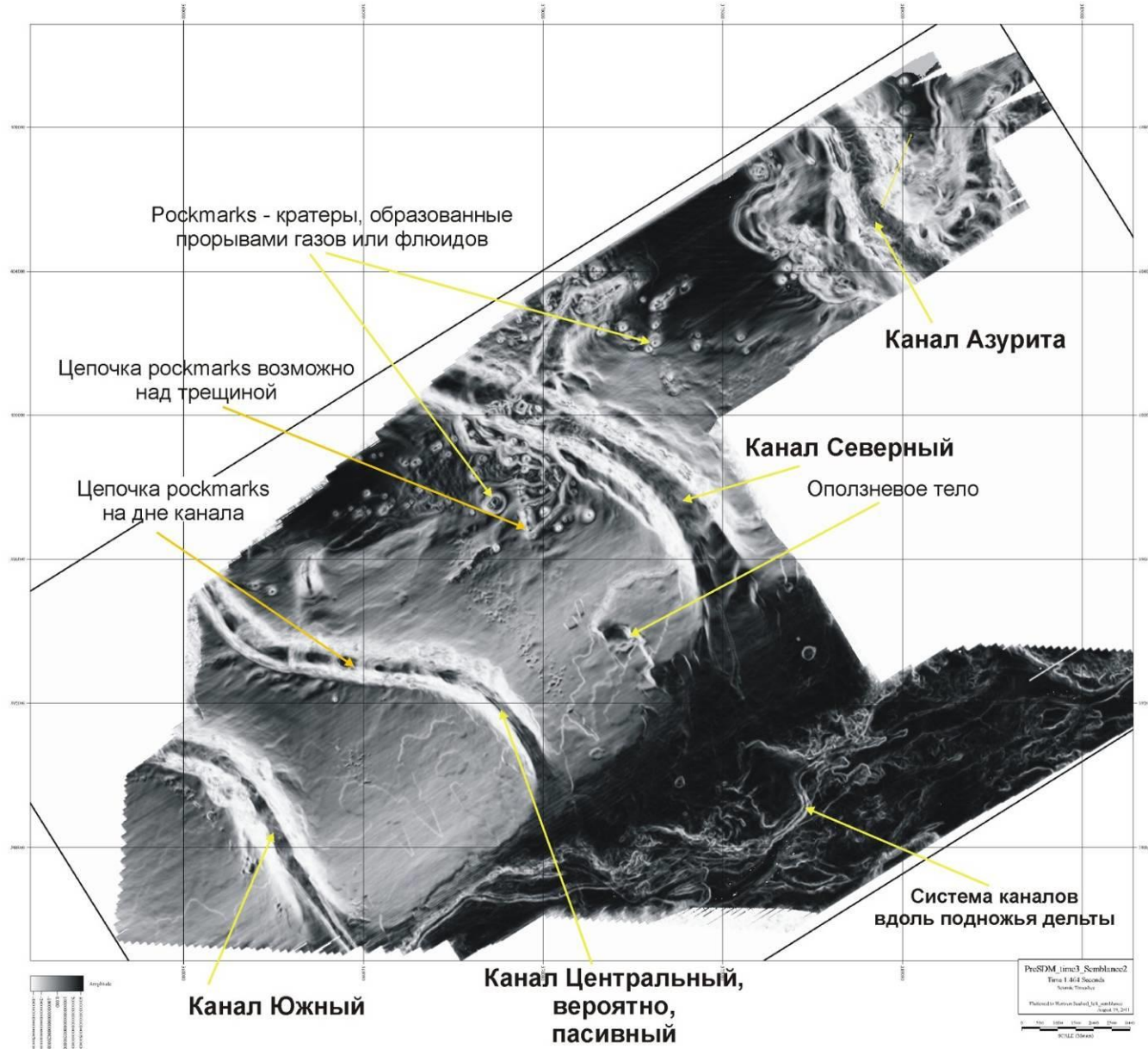


Фрагмент сейсмического профиля для одного из каньонов дельты Нигера (блок «Т»). Видно сходство его строения с каньоном Миссисипи. Вероятно, каньон в значительной степени заполнен отложениями транспорта масс.

А.М. Никишин, В. Никитина

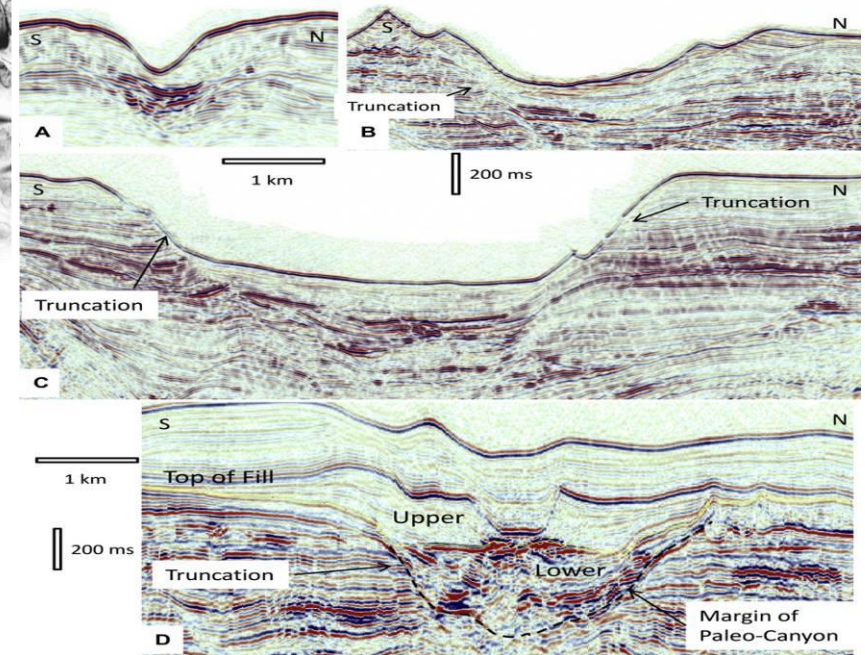
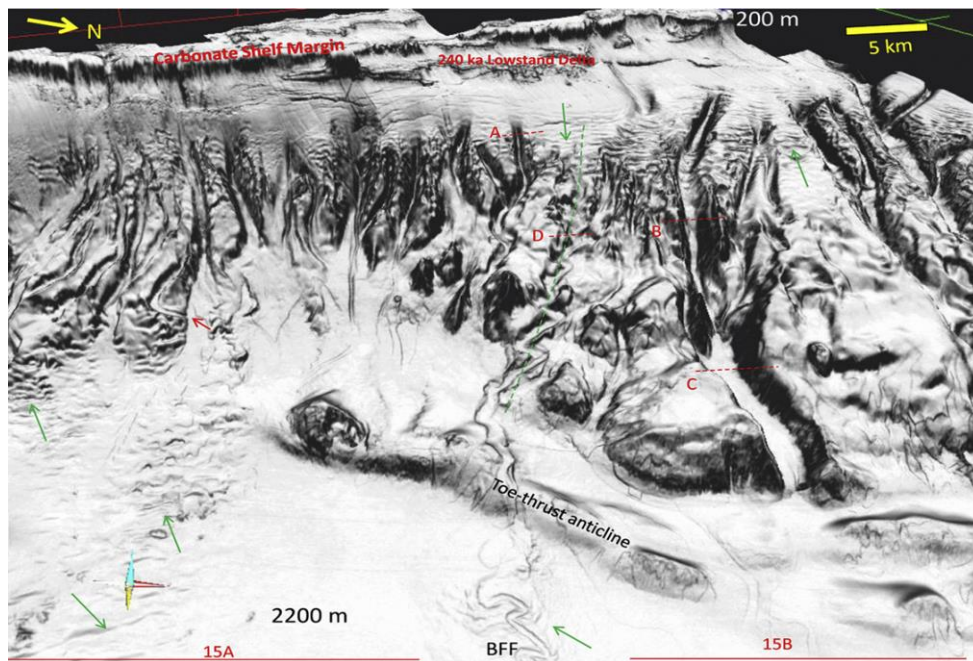


Рельеф дна континентального склона Экваториальной Гвинеи (блок “U”) (вверху) и карта RMS амплитуд для интервала дно + 50 мсек. Видно, что каналы в целом прямолинейные, без меандр. Видны отдельные кратероподобные формы. Это покмарки (rockmarks – оспины), кратеры образованные прорывами газов или флюидов; иногда они выстраиваются в цепочки. На картах видно, что многие каналы начинаются на склоне.



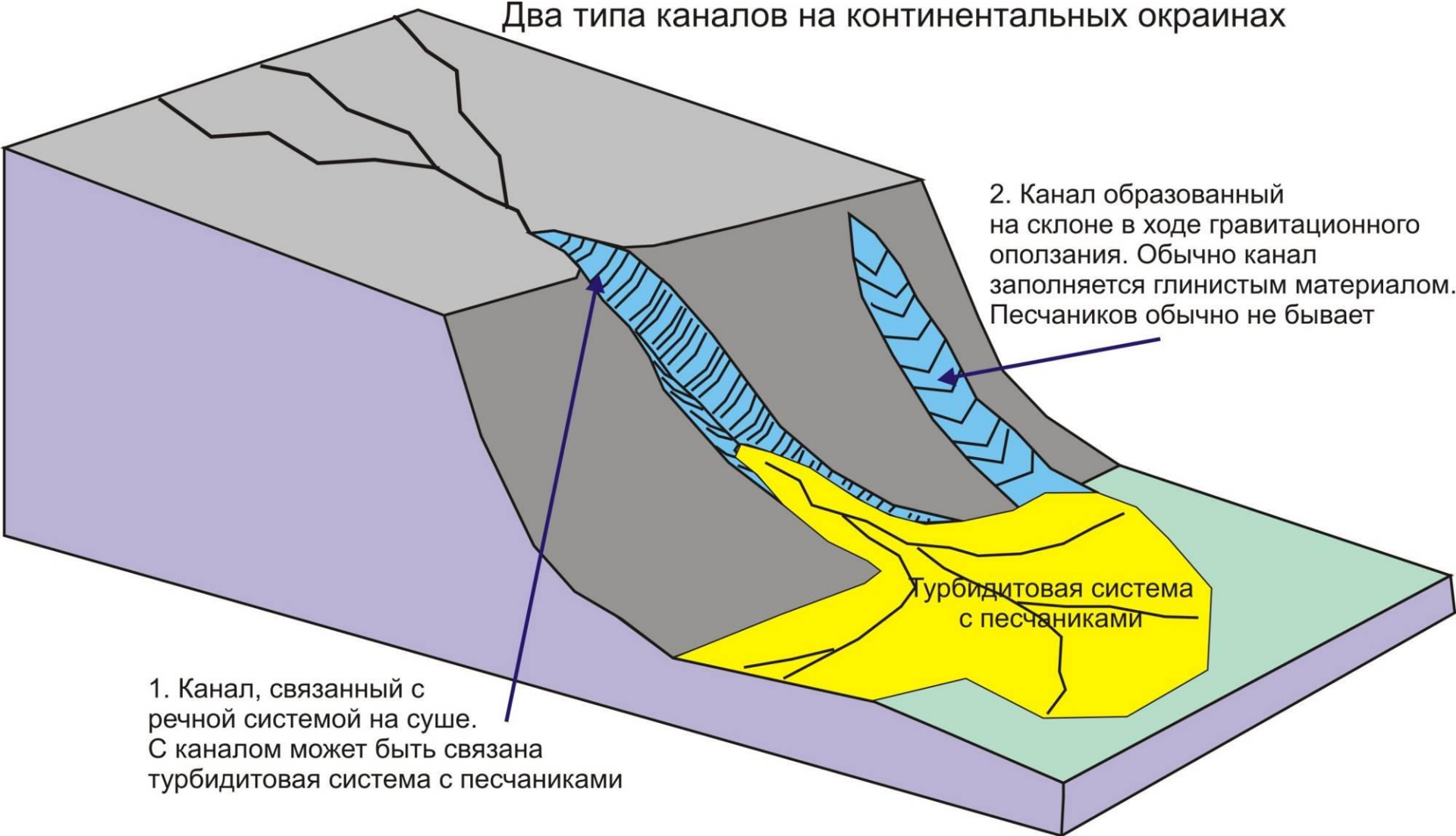
Рельеф часть дельты Нигера, показанный в виде карты когерентности. Видны в целом прямолинейные каналы. Широко распространены покмарки. Иногда они образуют цепочки на дне каналов.

А.М. Никишин, В. Никитина



Вид каналов на карте и разрезах на континентальном склоне о. Борнео в районе дельты реки Макахам (Saller, Dharmasamadhi, 2011). Видно большое разнообразие форм каналов на склоне

Два типа каналов на континентальных окраинах



Два типа каналов на континентальном склоне по характеру начала их образования. Первый тип каналов связан с речной системой на суше, второй – нет.

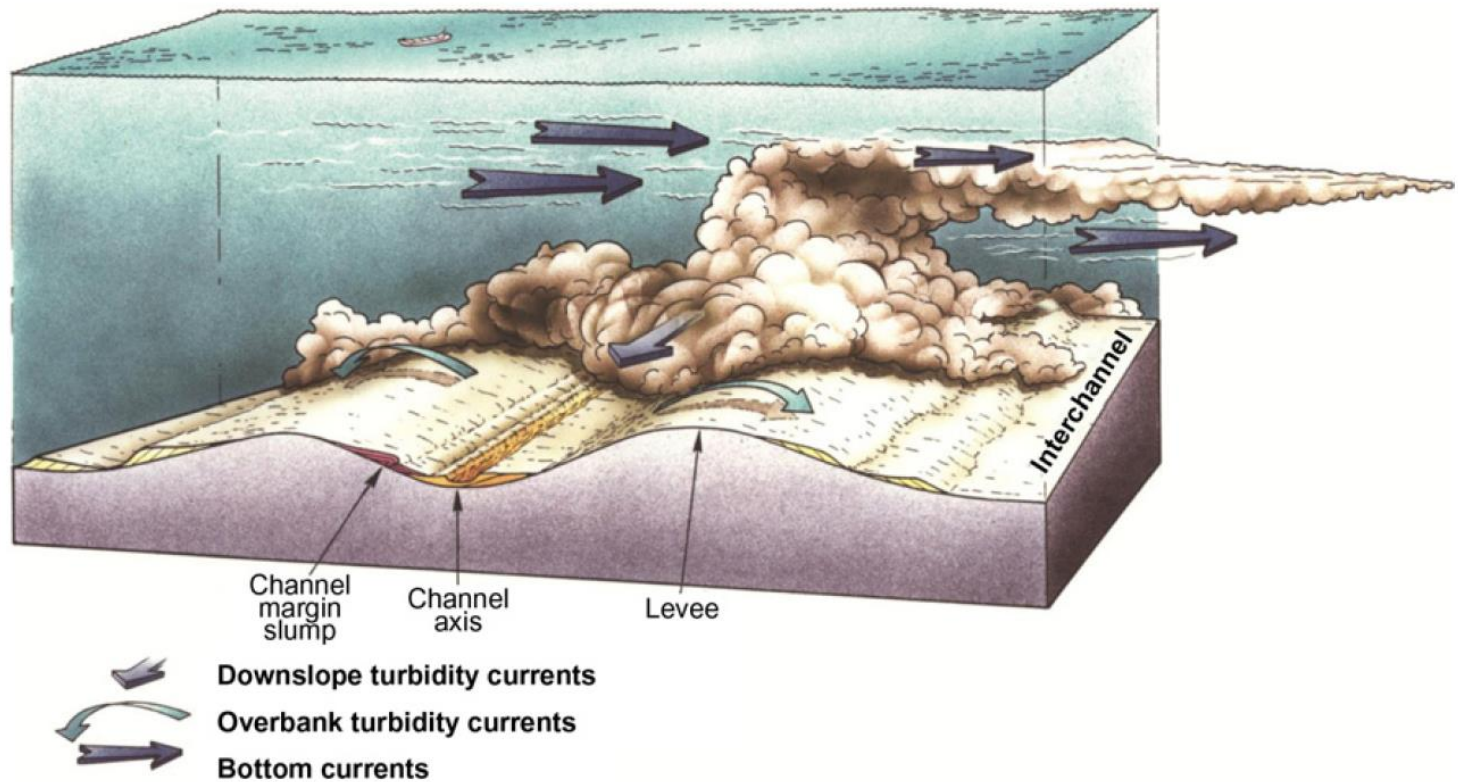
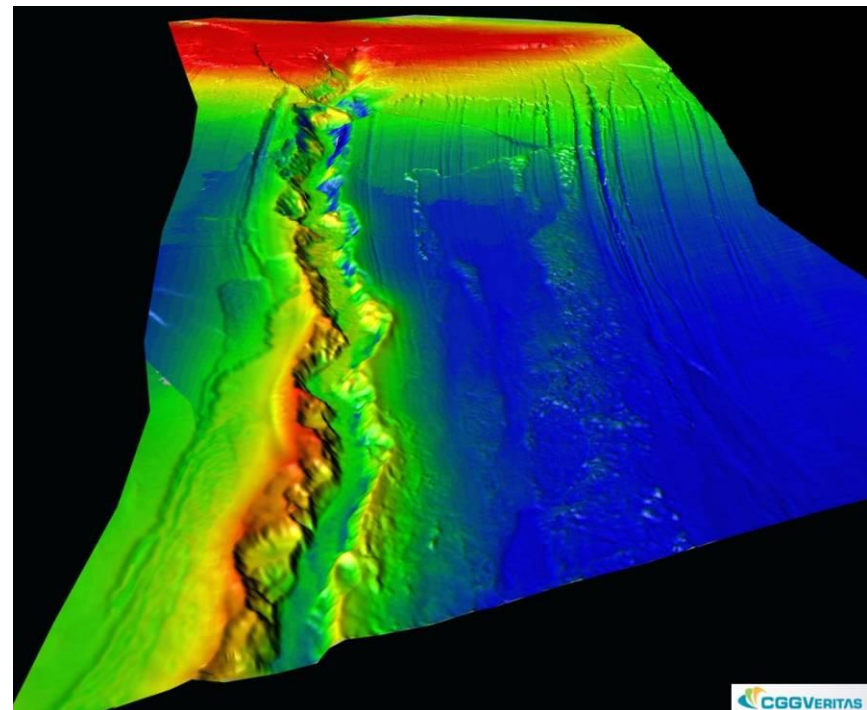
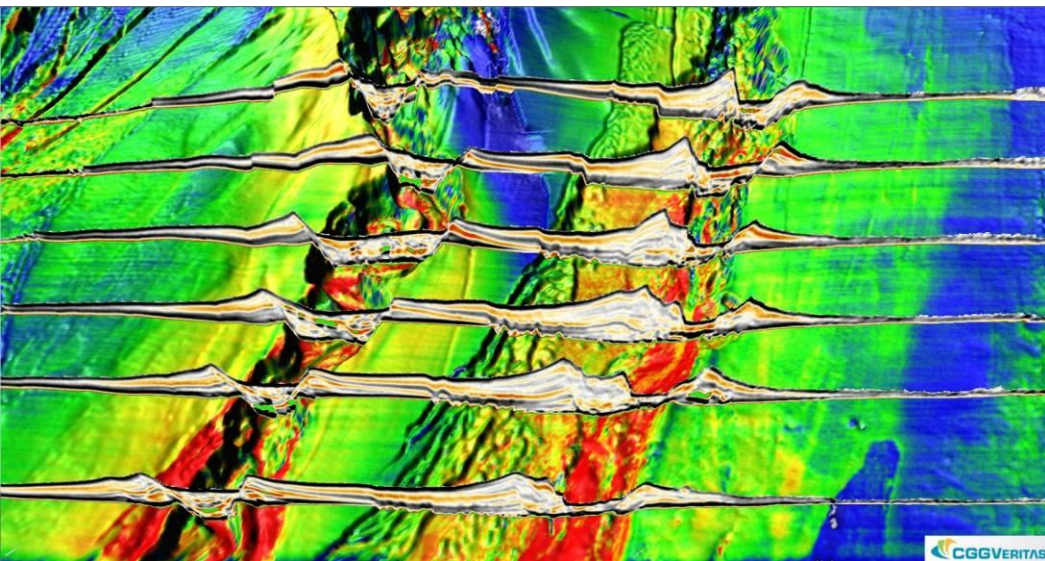
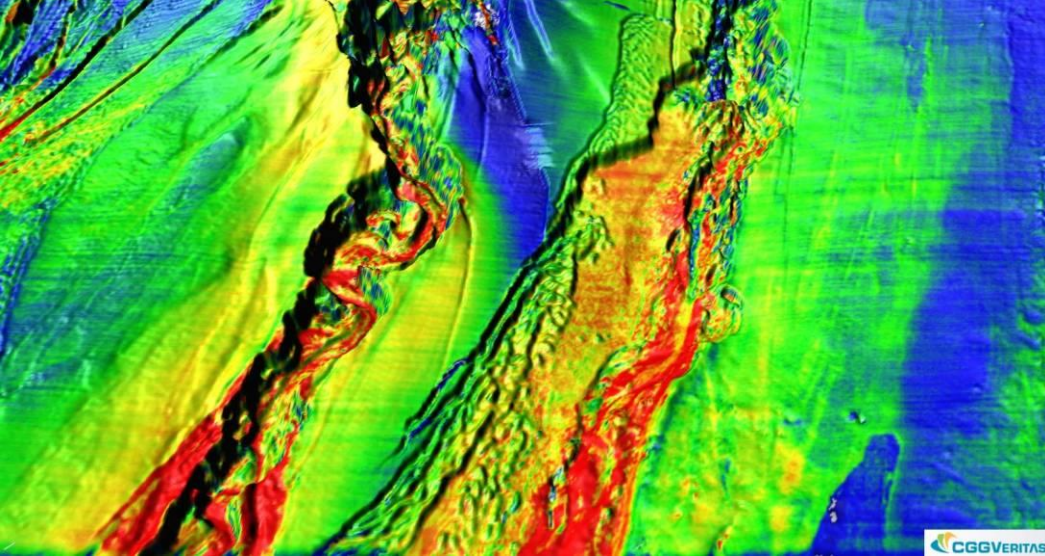
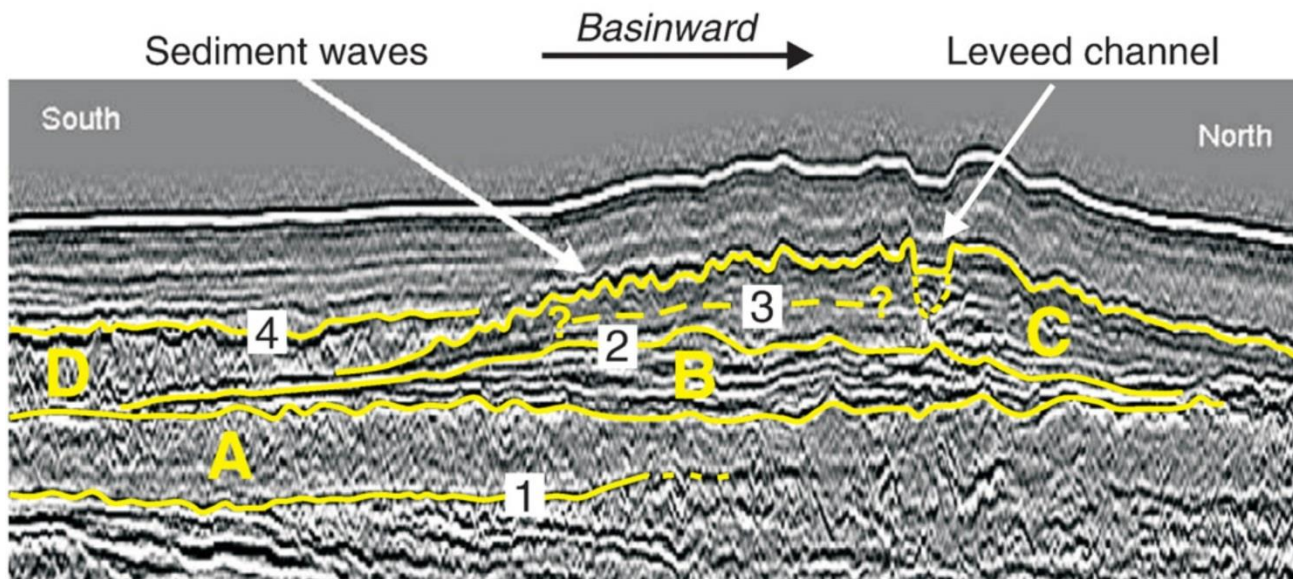
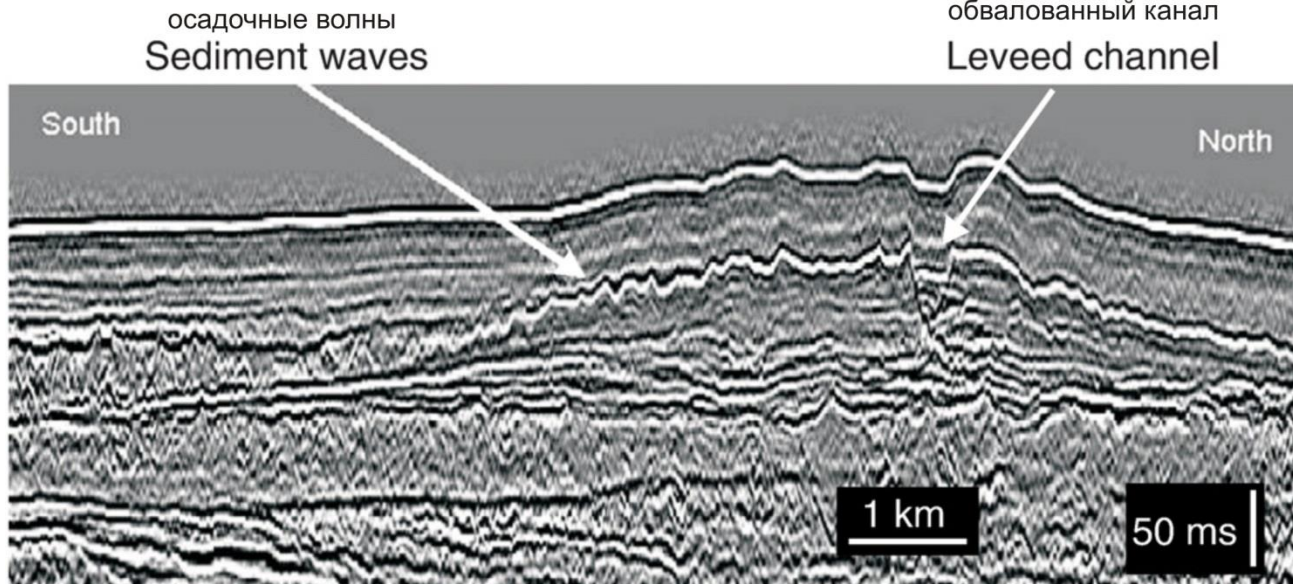


FIGURE 4.4 Conceptual model showing the spatial relationship between downslope turbidity currents and along-slope bottom currents (i.e., contour currents). Wind-driven, tide-driven, and internal tide-driven bottom currents are not shown. *After Shanmugam et al. (1993a), reprinted by permission of the American Association of Petroleum Geologists whose permission is required for further use.*

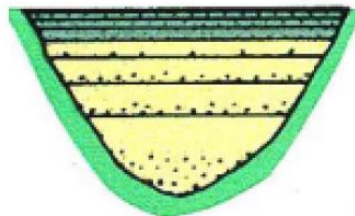
Модель образования турбидитовой системы с леви и конрутными течениями. Турбидитовый поток движется по каналу и на дне канала формируется осадок. Но турбидитовое «облако» намного шире канала, и из этого «облака» также выпадает осадок, образуя леви (вал). Донные морские течения могут широко разносить материал турбидитового «облака», образуя осадочные породы, называемые контуритами. Модель по (Shanmugam, 2000). Детали данной модели остаются дискуссионными.



Вид обвалованных каналов (leveed channels) в рельефе дна моря и на сейсмических разрезах.
Данные CGGVeritas.



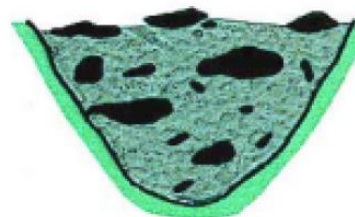
A — mudflow deposits (chaotic internal facies): early stage of forced regression; B — turbidity-flow frontal splay (well-defined parallel reflections): late stage of forced regression; C — leveed channel and overbank facies (high-amplitude reflections associated with the sandy channel fill and weak reflections/transparent facies associated with the finer grained overbank deposits): lowstand normal regressive and early transgressive deposits; D — mudflow deposits (chaotic internal facies): late transgressive deposits. Note the gradual progradation of gravity-flow deposits into the basin from A to C, and the retrogradation from C to D. Sequence stratigraphic surfaces: 1 — correlative conformity sensu [Posamentier and Allen \(1999\)](#); 2 — correlative conformity sensu [Hunt and Tucker \(1992\)](#); 3 — maximum regressive surface (cryptic, within an undifferentiated succession of low-density leveed-channel turbidites); and 4 — maximum flooding surface.



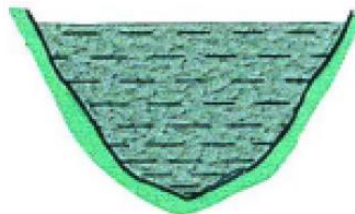
ТУРБИДИТЫ, УТОНЧАЮЩИЕСЯ ВВЕРХ
(фации А и В)



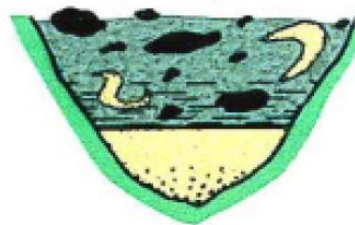
ОПОЛЗНИ
(Фация F)



ОБЛОМОЧНЫЕ ПОТОКИ
(Фация F)



ГЕМИПЕЛАГИТЫ
(Фация G)



КОМБИНАЦИЯ
(Фации А, В, F, G)

Примеры седиментации в склоновом канале. (Shanmugam, 2000)

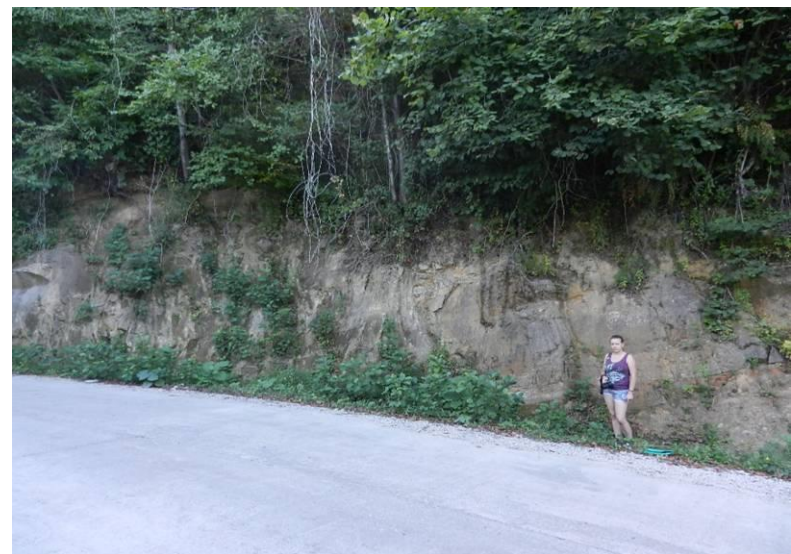


Вид обнажения склонового канала-1 олигоцена (майкопская серия). Толща песчаников толщиной более 4 метра залегает на тербидитовых глинах со слоями песчаников. Песчаники выполняют часть палеоканала.

В них имеются линзы песчаников и элементы косых серий. Песчаники неоднородны и содержат рассеянные мелкие фрагменты глин. Пачка песчаников образовалась за счет амальгамации многих слоёв песчаников. Имеются фрагменты обуглившейся древесины. Район с. Шиловка



Вид обнажения склонового канала-2 олигоцена (майкопская серия). Вверху показан общий вид обнажения. Выделяется три пачки. Пачка 1 – переслаивание маломощных турбидитовых песчаников и глин. Пачка 2 – толща дебритов с фрагментами неокатанных осадочных пород, толщина 1,5 метра (среднее фото). Пачка 3 – толща безструктурных песчаников (нижнее фото); в этой пачке имеются тонкие прослои глин и горизонтами с неокатанными кластами глин. Пачка образована амальгамацией нескольких слоёв песчаников. Район с. Шиловка.





Вид пачки песчаников канала-2. Вверху – общий вид пачки, внизу – в песчаниках имеются слои глин и отдельные класты неокатанных фрагментов глин. Класты глин образованы при выпахивании турбидитовым потоком дна канала, сложенного глинами



Вид пачки песчаников канала-3. Вверху – общий вид пачки песчаников. Внизу наблюдаются песчаники безструктурные (массивные) толщиной более 5 метров, вверху они переходят в тонкослоистые песчаники, а еще выше (на фото не видно) в пачку тонкослоистого переслаивания песчаников и глин. На нижней фотографии показана граница массивных и слоистых песчаников. Район с. Шиловка.



Вид тела склонового канального песчаника с внутренней линзой песчаника. Канал-4. Район с. Шиловка

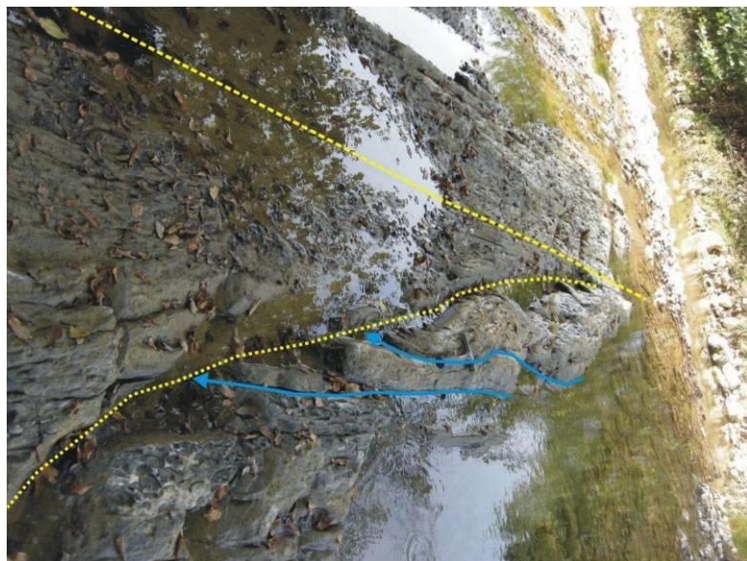


Фото структур песчаников канала-4. На верхних фотографиях видны класты осадочных пород в песчаниках, на нижних – общая грубозернистость песчаников и их плохая сортировка. Виден отпечаток листика.



В келловейских (среднеюрских) глинах наблюдается линзовидное тело, выполненное пластами песчаников и глин. Вероятно, это заполнение палеоканала.

Отметим, что толщина песчаника в основании линзы вверх быстро уменьшается, он заполнил узкий канал на дне бассейна.



Модель образования и заполнения канала в майкопских глинах



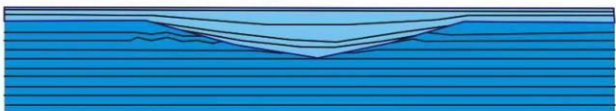
1. Формирование слоистой толщи глин



2. Формирование эрозионного канала

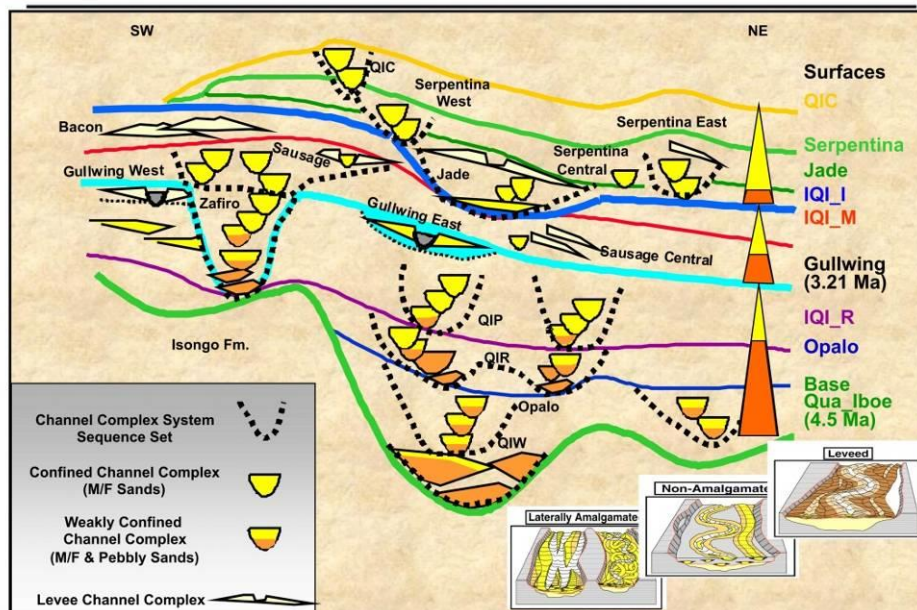
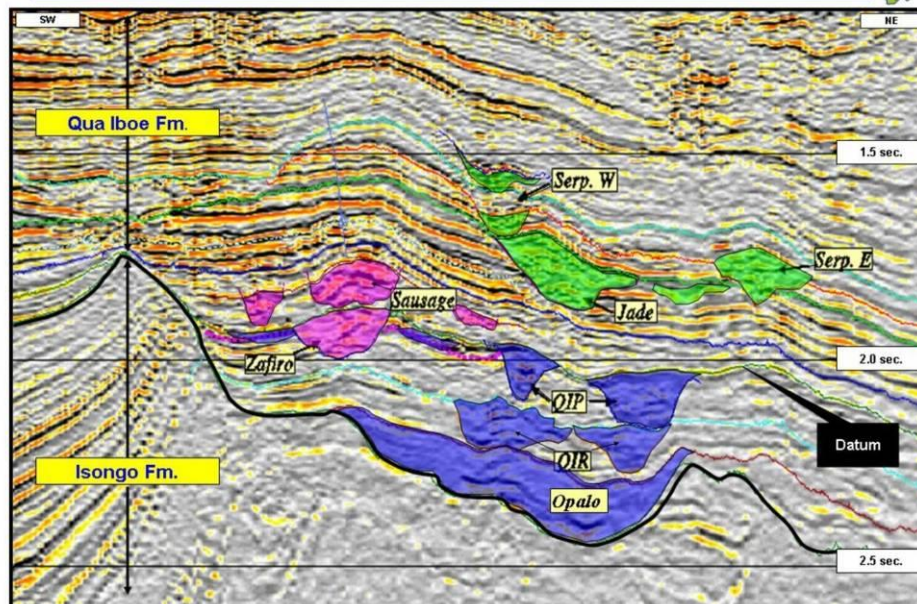


3. Оползание на склонах канала

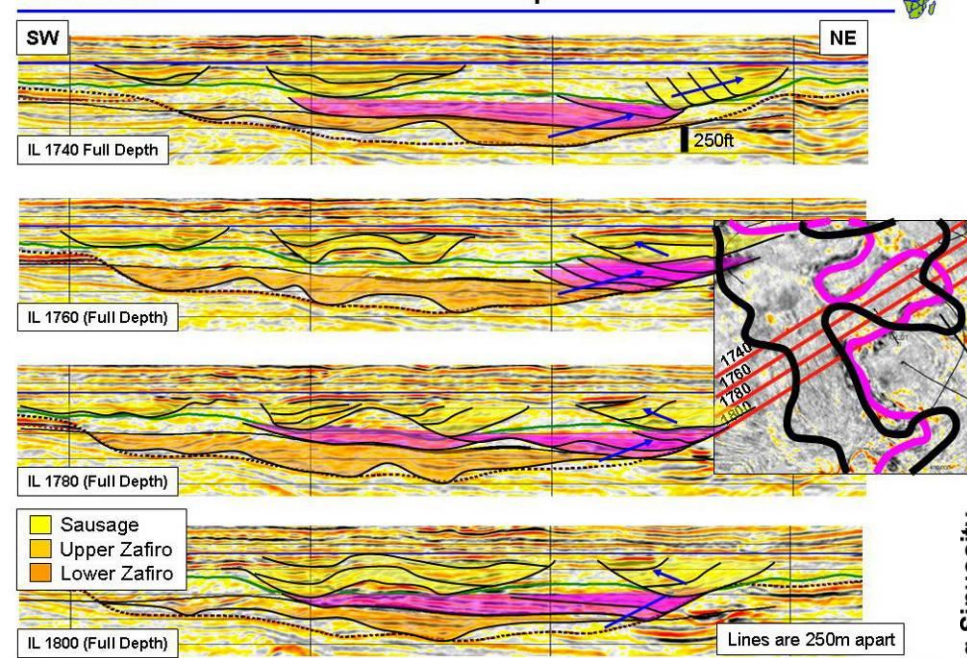


4. Заполнение канала новой серией слоистых майкопских глин (так как в обнажении мы видим только край канала, то не известно, есть ли песчаники в осевой части палеоканала)

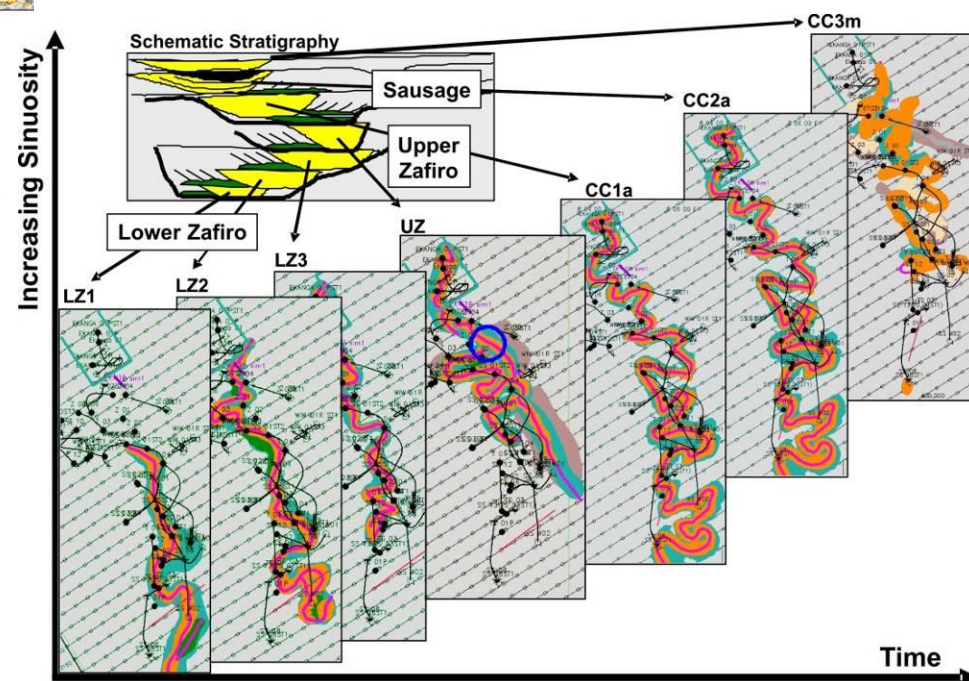
Фото полевого обнажения майкопских глин в Абхазии. В толще глин наблюдается эрозионный канал также заполненный глинами.



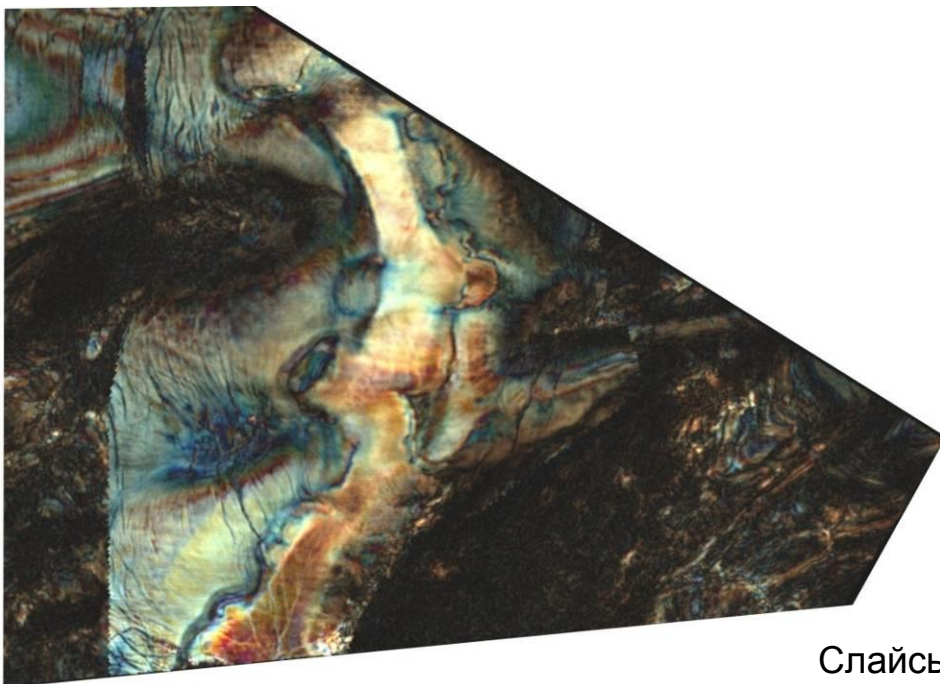
Сейсмический разрез и стратиграфия месторождения Зафи́ро.



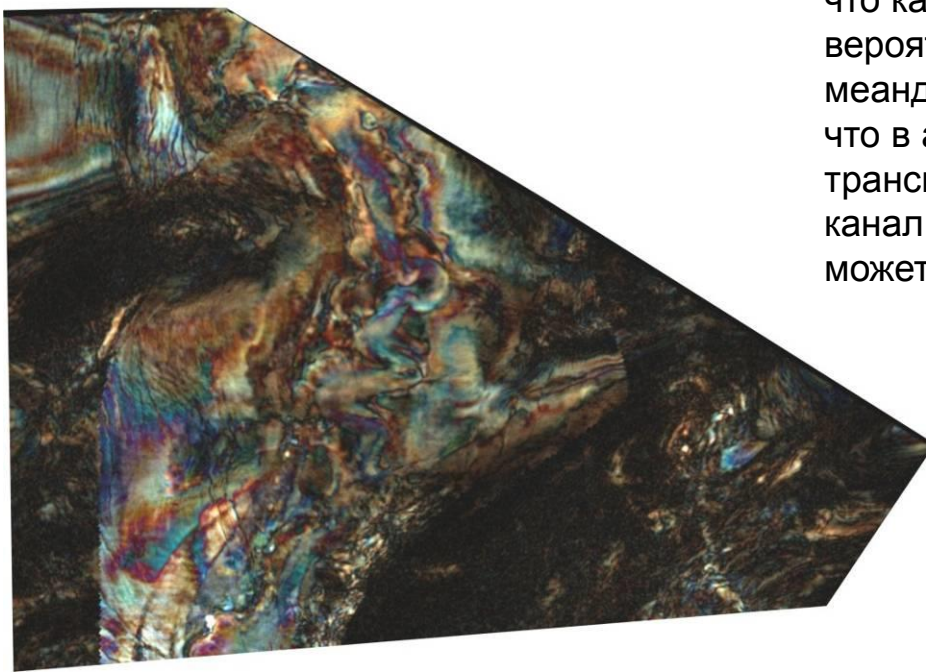
Разрезы через каналные системы месторождения Зафи́ро

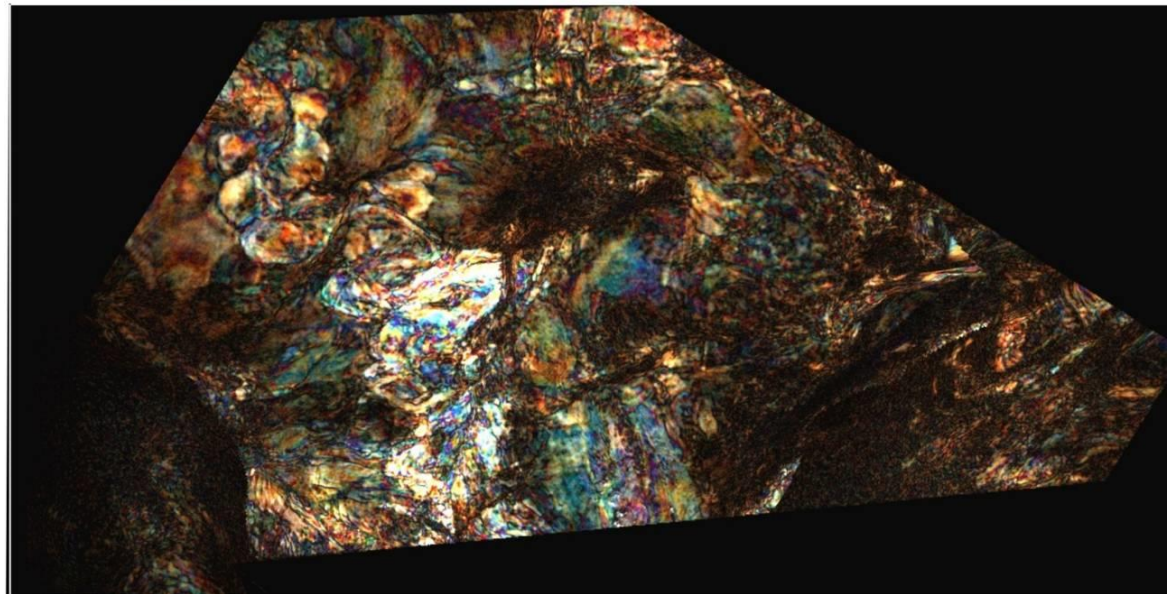
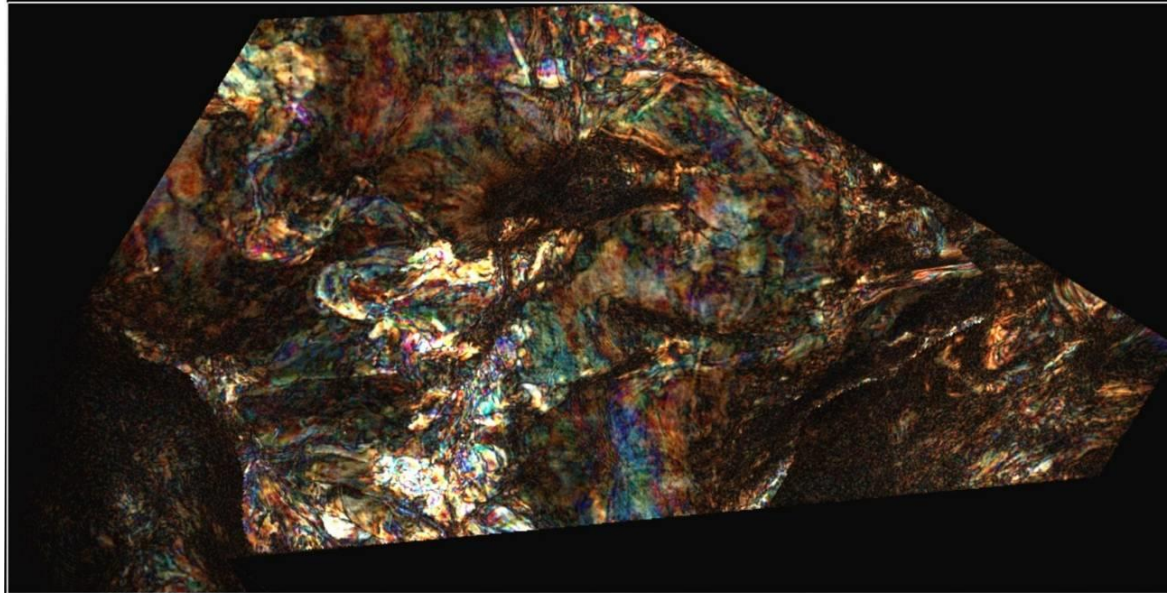


Эволюция каналной системы Зафи́ро во времени, заметно увеличение синусоидальности геометрии каналов.



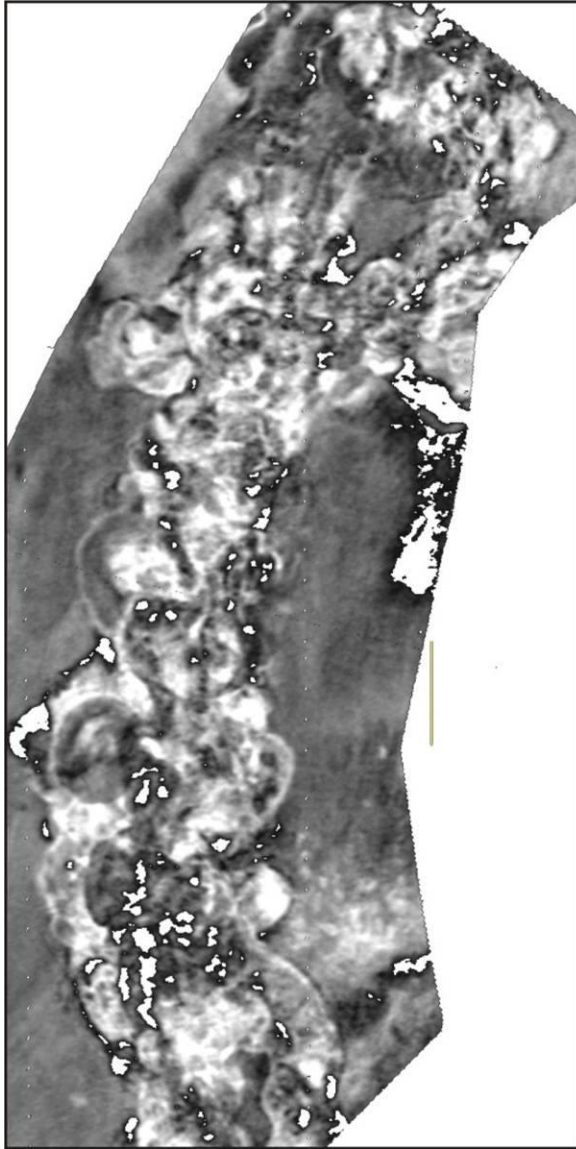
Слайсы спектральной декомпозиции для района канала Азурита. Верхний слайс показывает, что канал сверху перекрыт однородной толщей, вероятно – глиной. На нижнем слайсе четко видны меандрирующие русла. Это указывает на то, что в активной стадии развития по каналу транспортировался турбидитовый материал и канал длительно развивался. Канальная система может иметь каналные песчаные тела.



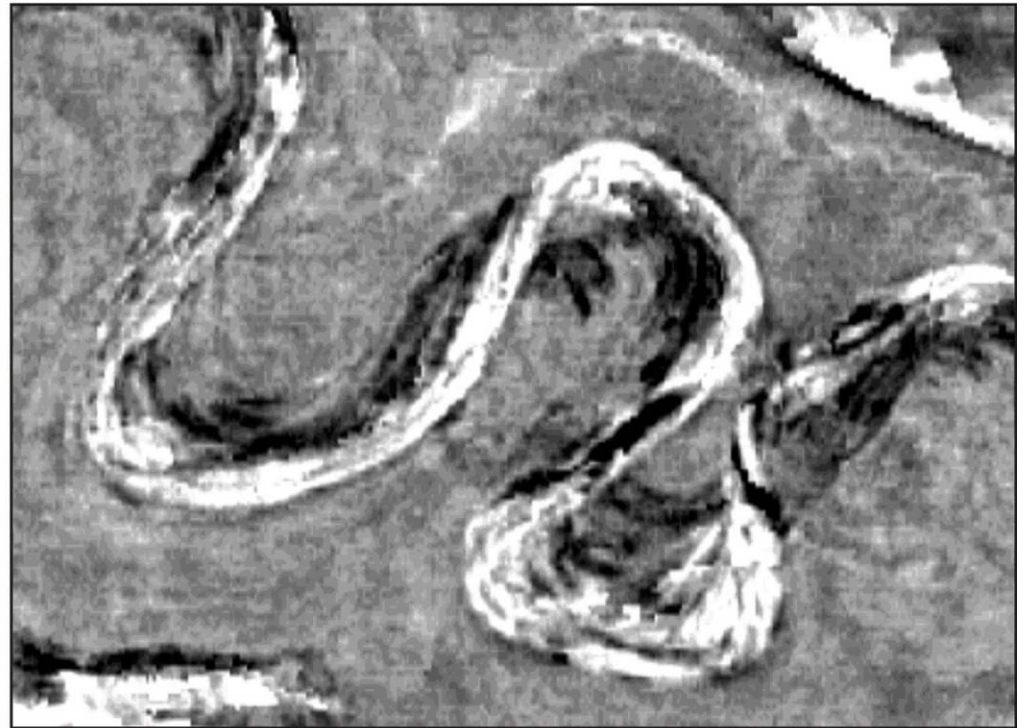


Слайсы спектральной декомпозиции для канальной системы Диоптаз. На слайсах чётко видна сильно меандрирующая система русел, из этого вытекает, что могли формироваться тела канальных песчаников

**Disorganized
(неорганизованный)**

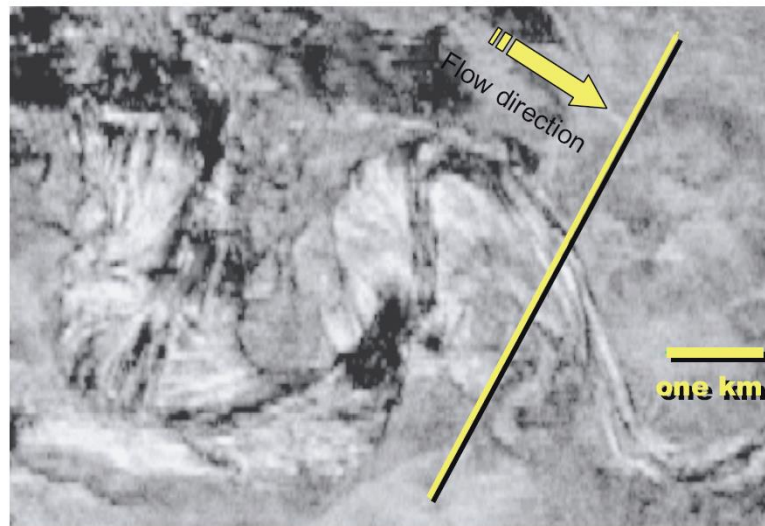


**Organized
(организованный)**

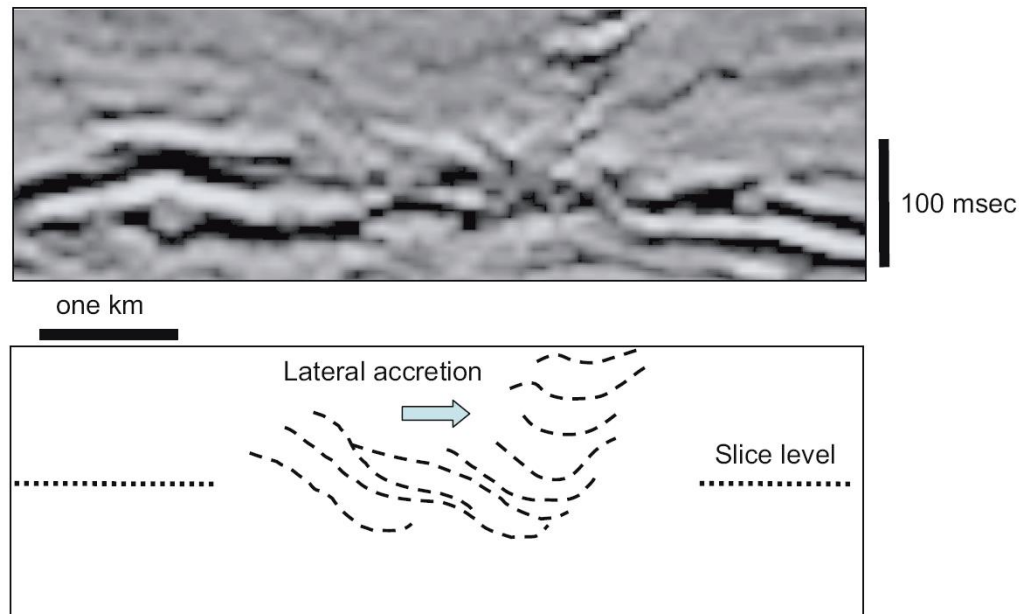


Вид на сейсмическом слайде «неорганизованного» и «организованного» каналов
(Posamentier, Walker, 2006)

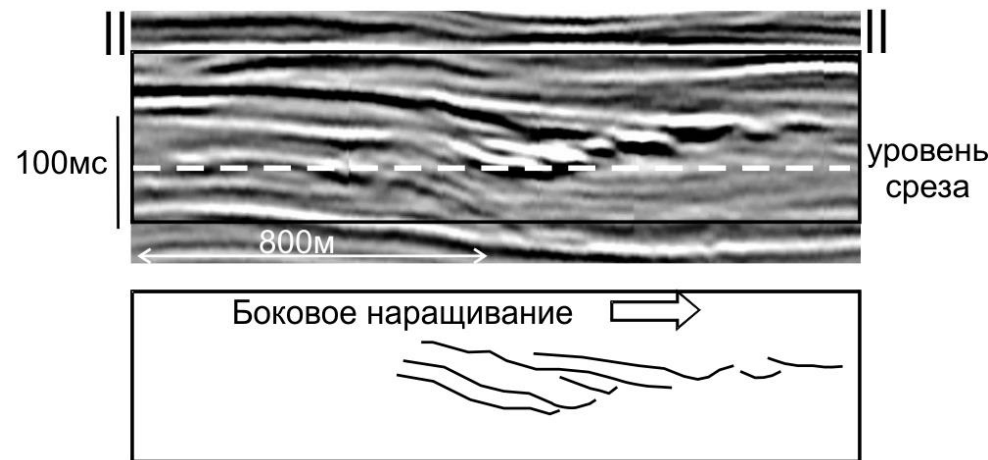
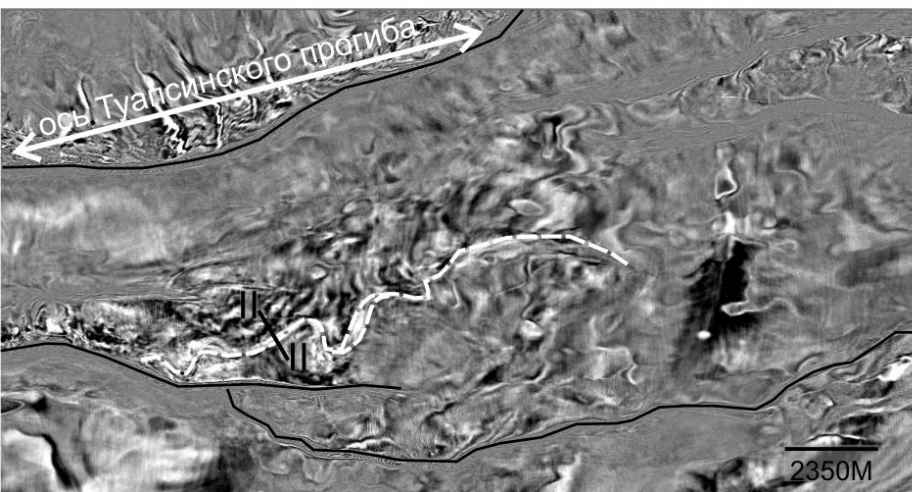
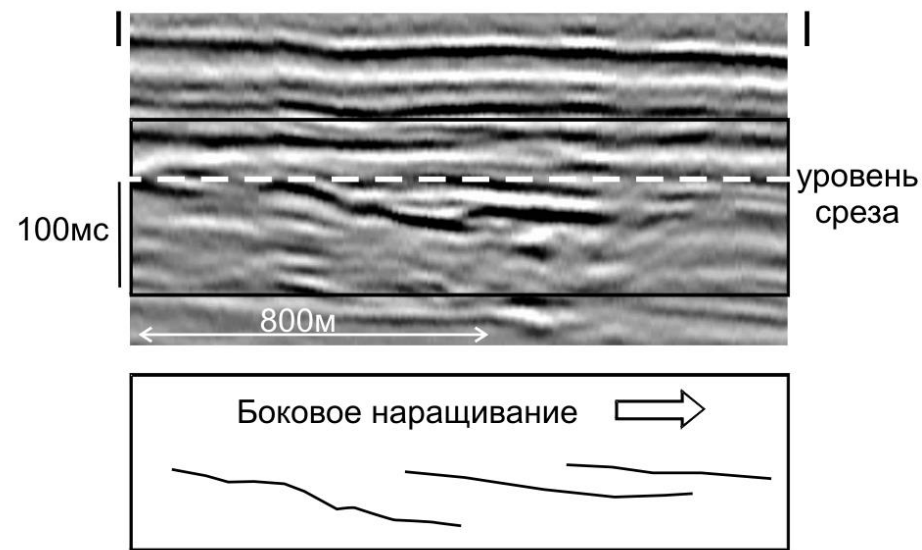
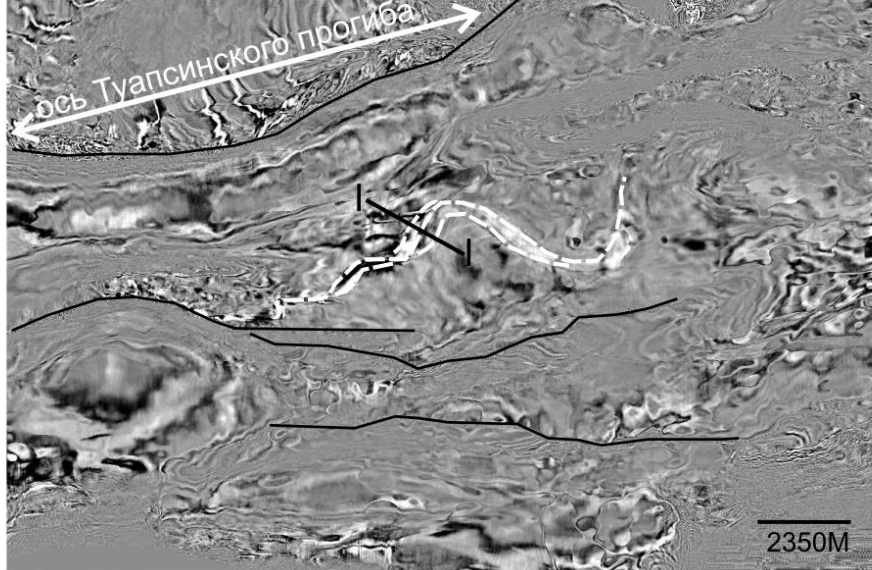
A



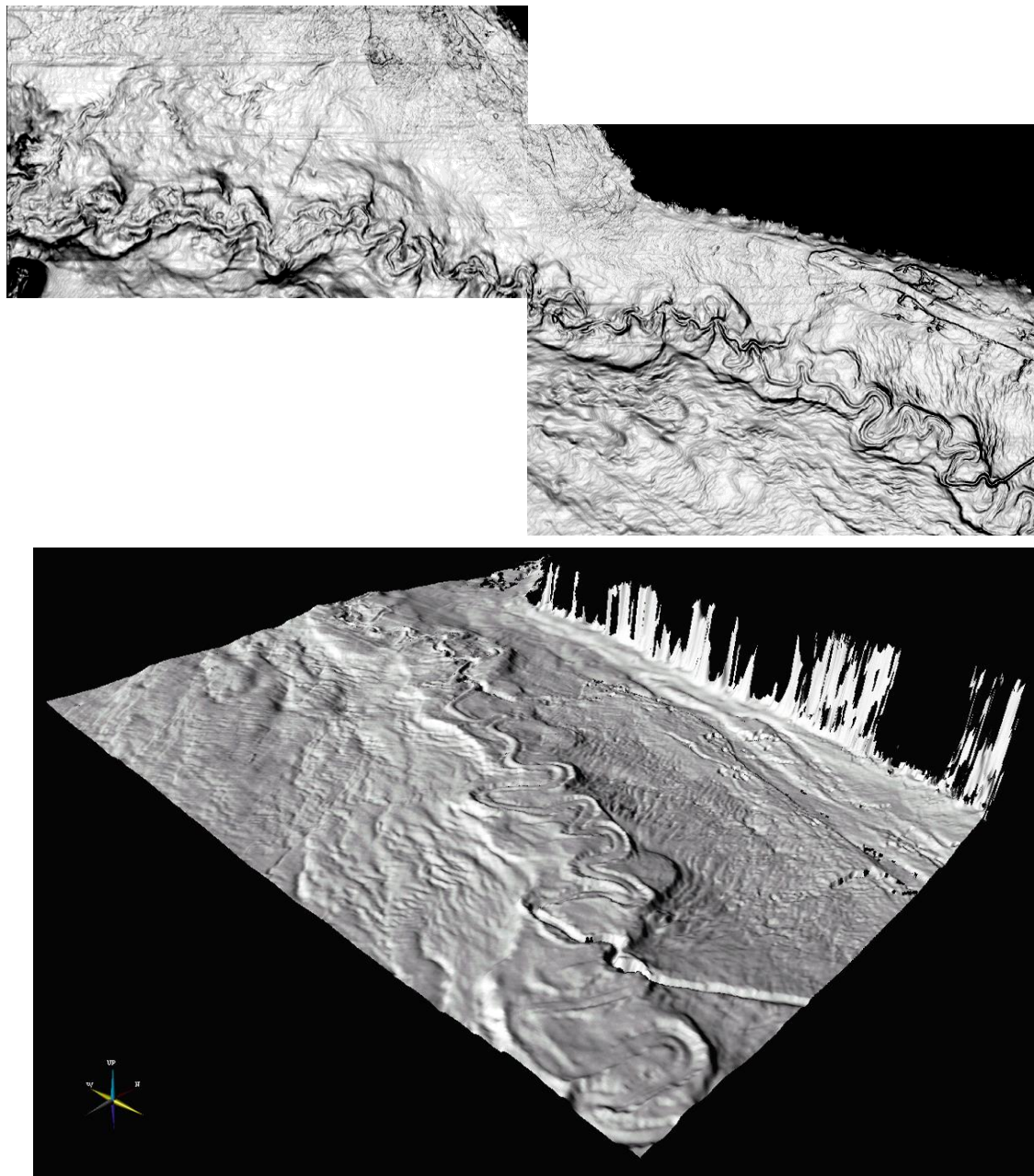
B



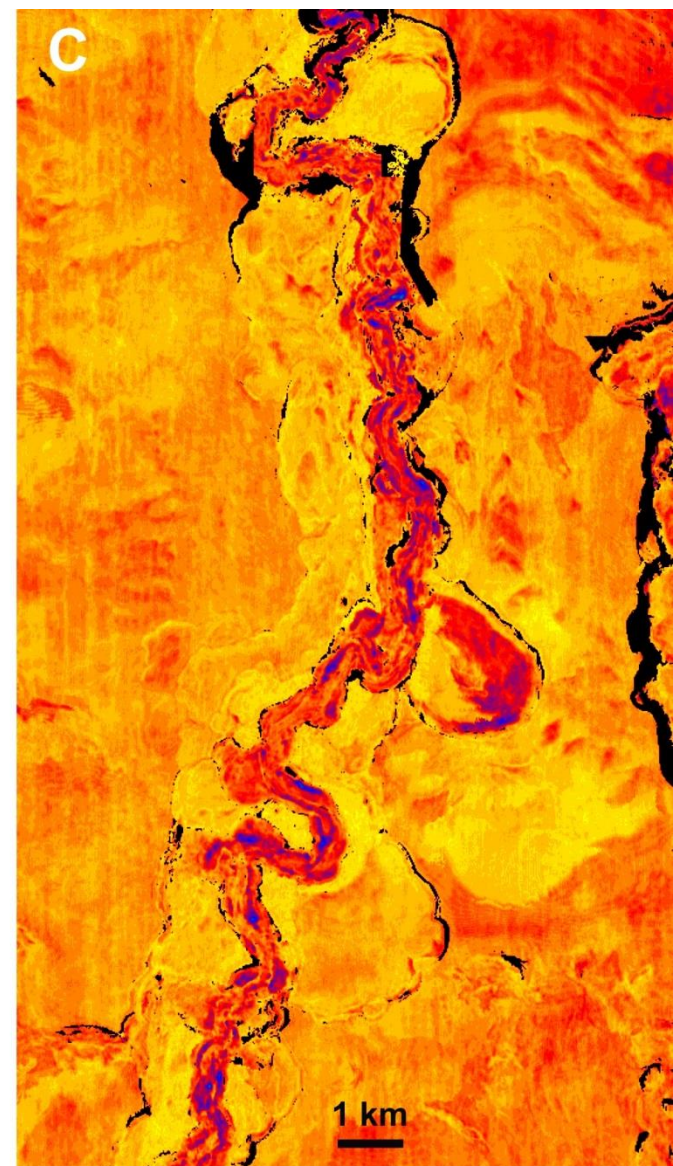
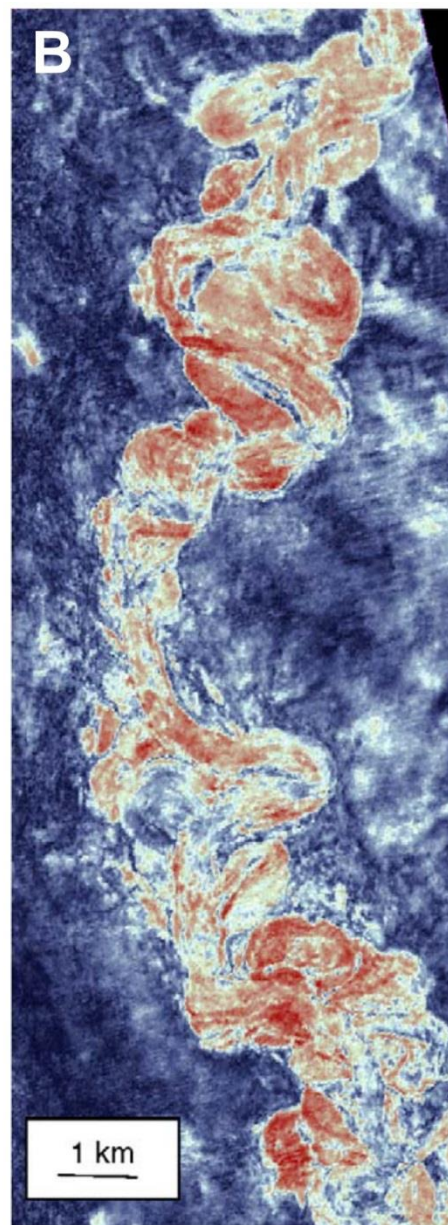
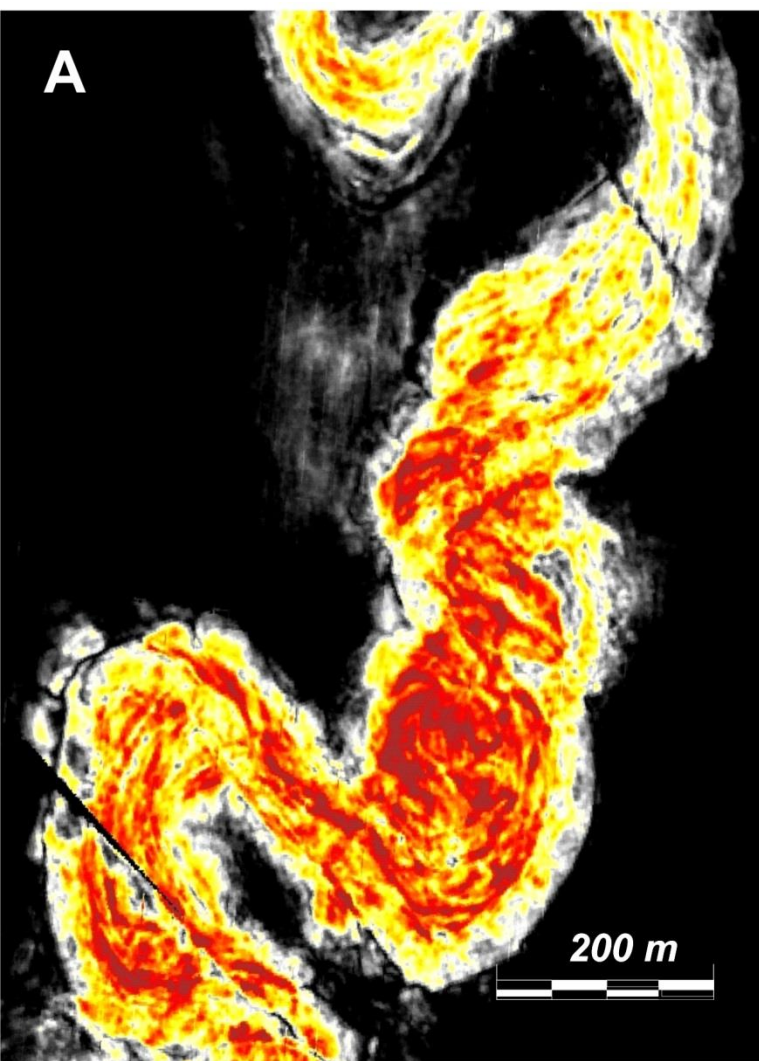
На сейсмическом слайсе (A) хорошо видна меандрирующая система канала с леви. На сейсмическом профиле и его интерпретации четко видна латеральная аккреция, что является типичным для «организованных» каналов (Posamentier, Walker, 2006).

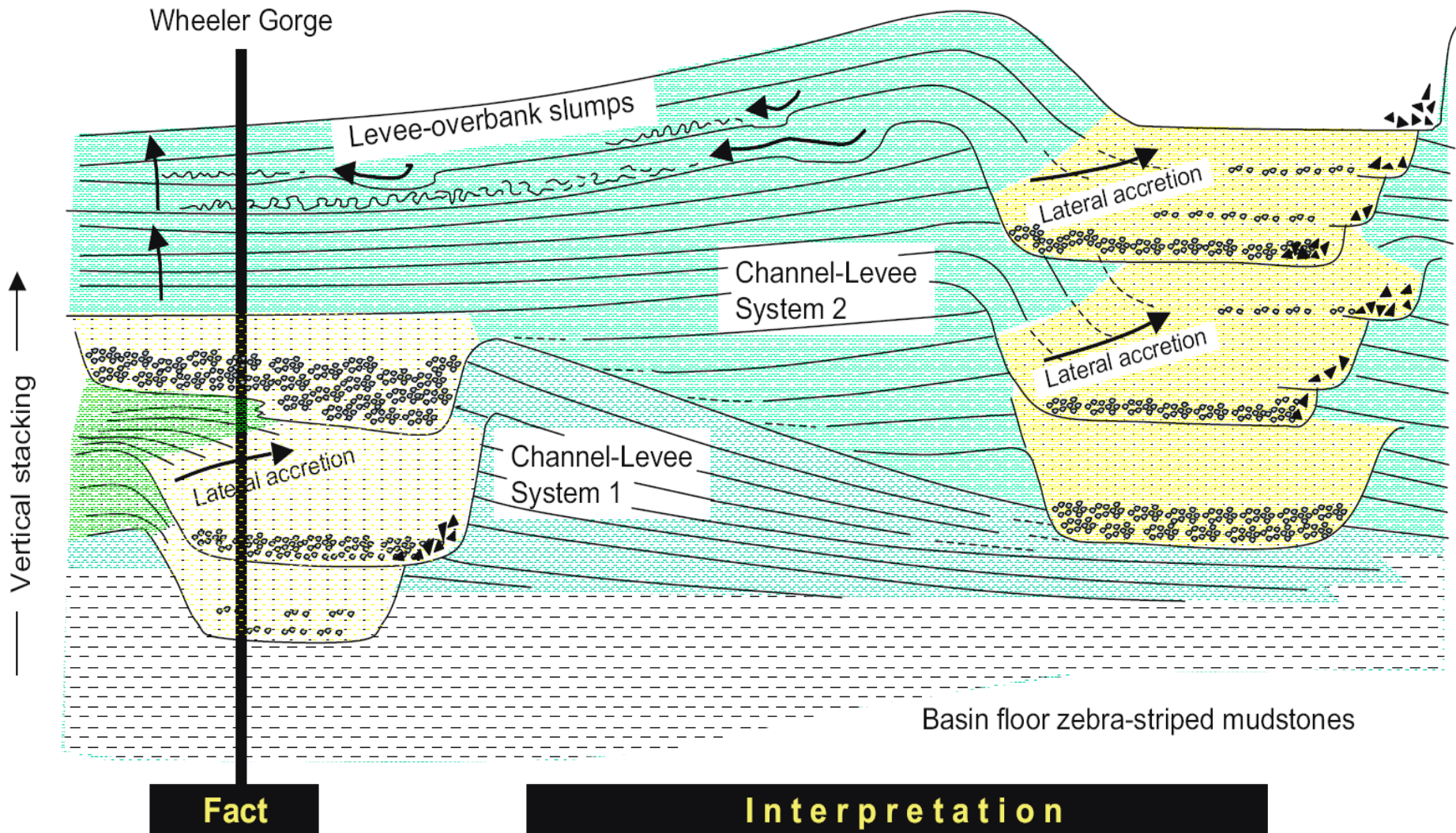


Слева показаны два сейсмическиз временных слайса для майкопских отложений Туапсинского прогиба Черного моря, справа показаны разрезы к ним и их интерпретации. Меандрирующая система вверх по разрезу меняет свою геометрию и типично боковое наращивание (lateral accretion), что свидетельствует в пользу того, что канал «организованный» (Митюков и др., 2011, 2012).



Вид канала с леви на дне Мексиканского залива. Канал формируется на поднятии, образованном осадками леви (Posamentier, Walker, 2006)





Модель строения каналов с левы, построенная на основе полевых работ по изучению канальных комплексов в Калифорнии (Posamentier, Walker, 2006)

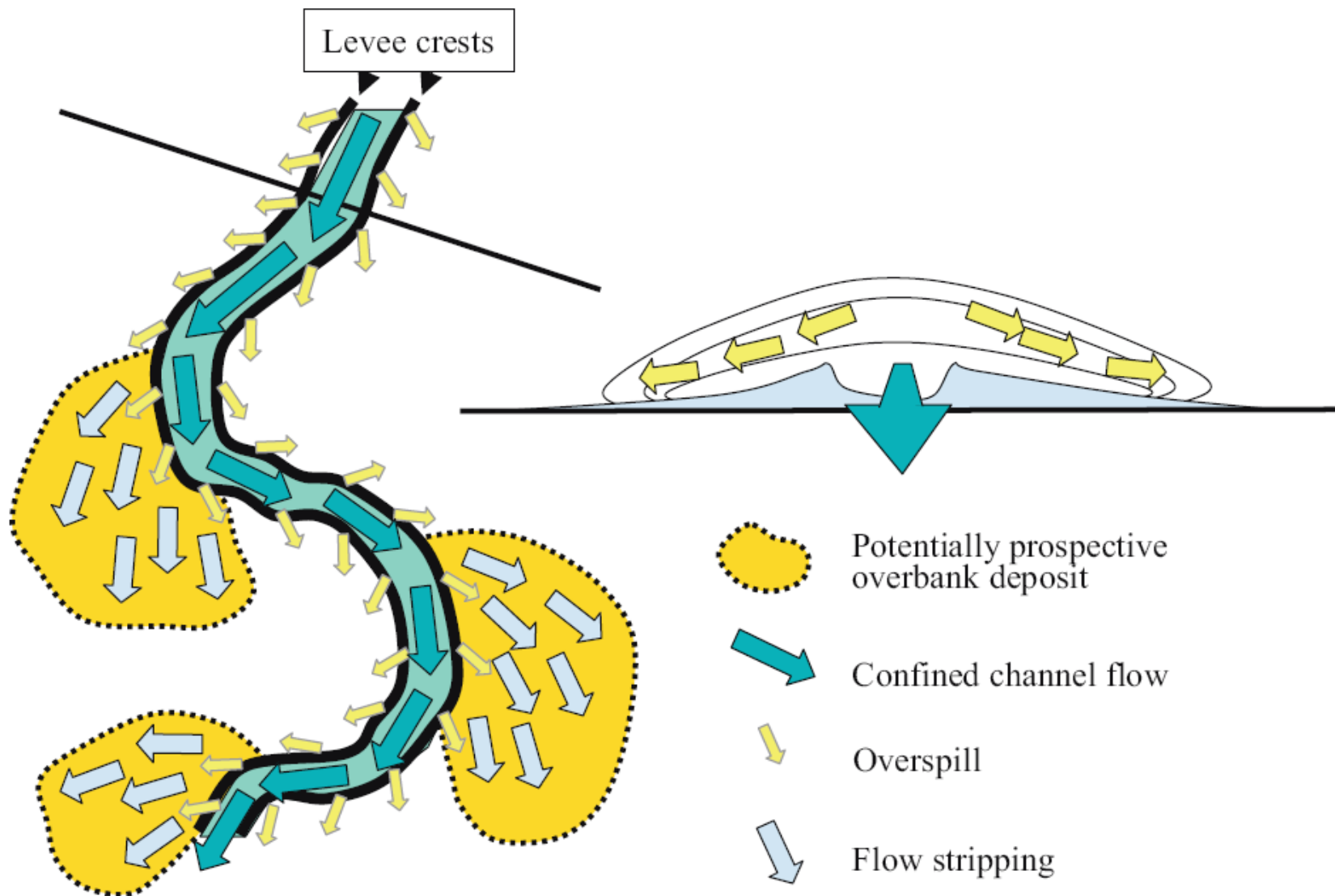
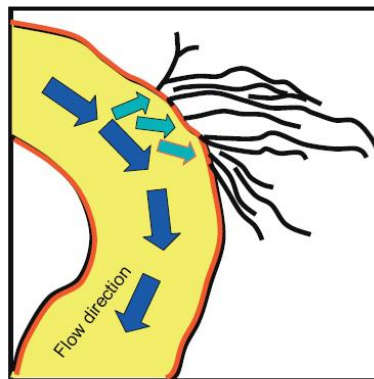
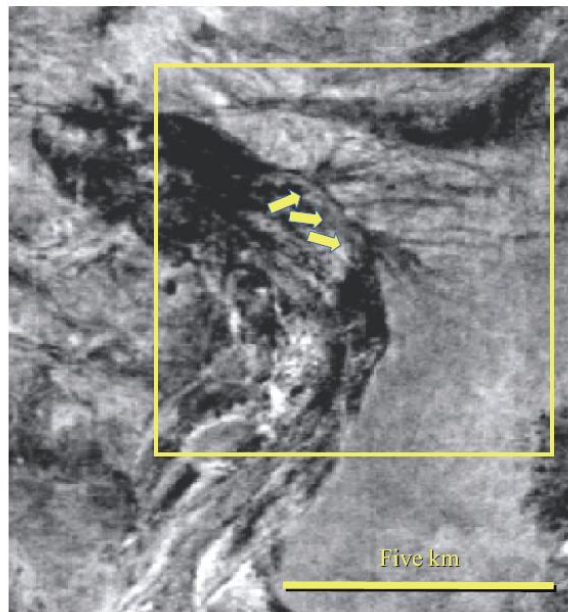
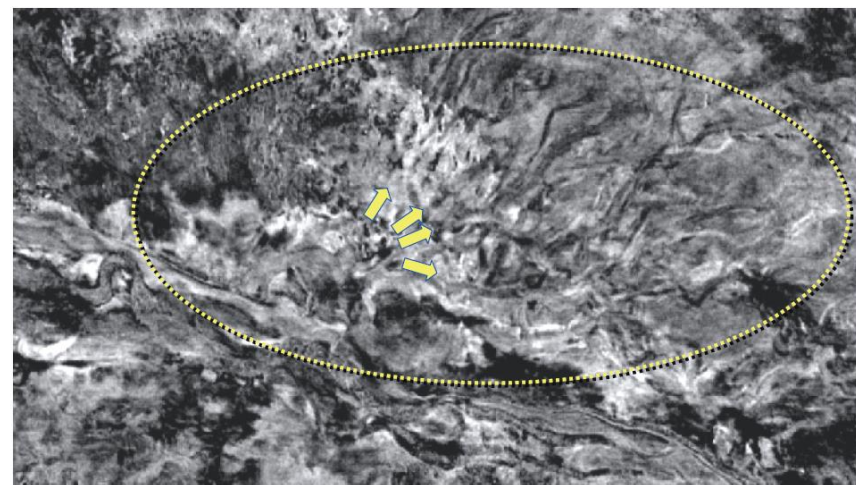


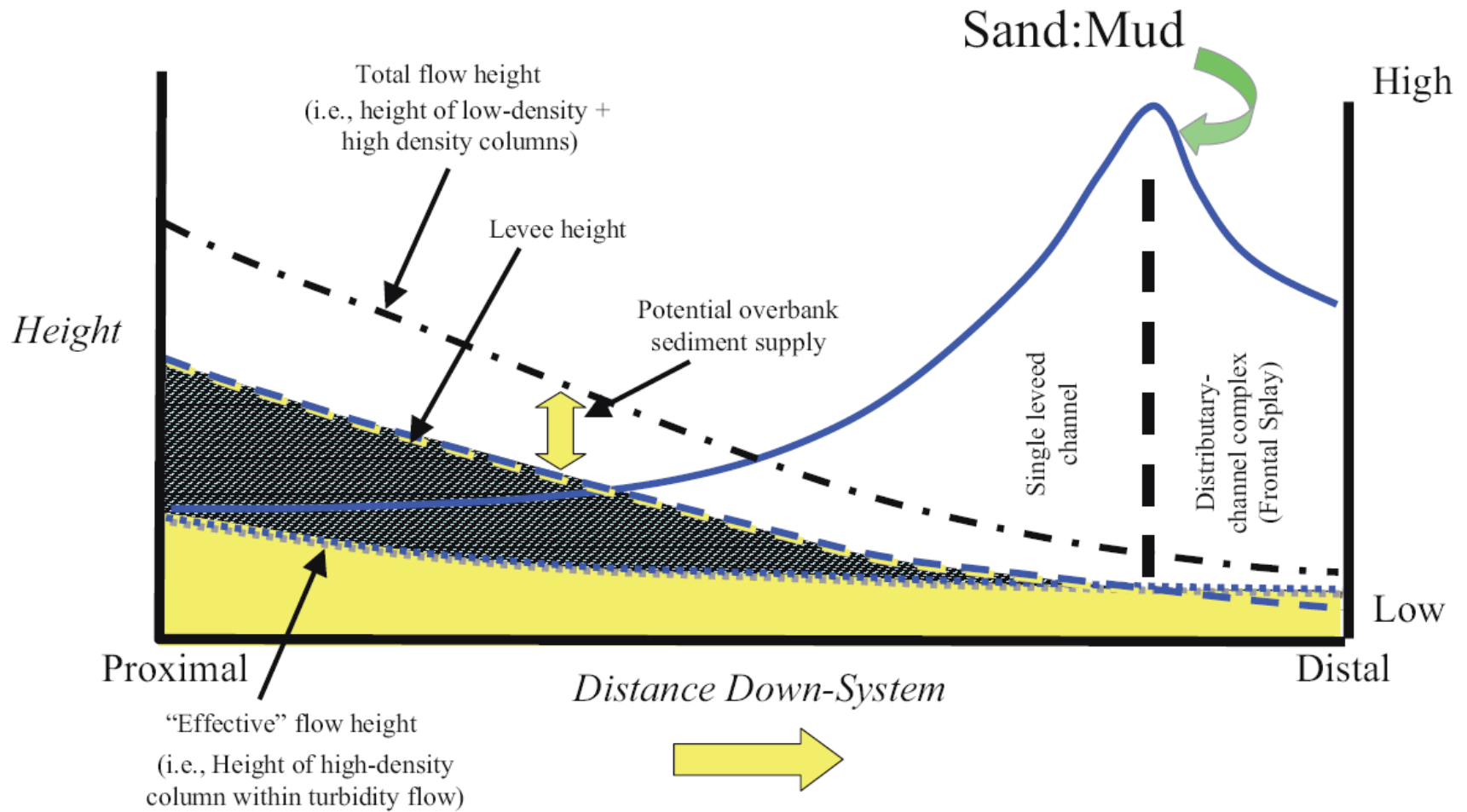
Схема строения канала с леви (leveed channel) с разрезом. Разрез показывает, что турбидитовый поток располагается над гребнем леви. В местах изгиба канала турбидитовый поток может продолжать прямолинейное движение и образовывать осадок на поверхности леви с повышенным количеством песка (overbank deposits – отложения поверх поднятия, наложенные отложения).



На сейсмическом слайсе наблюдается как из основного канала произошел прорыв материала в зоне с конусами прорыва (crevasse splay).

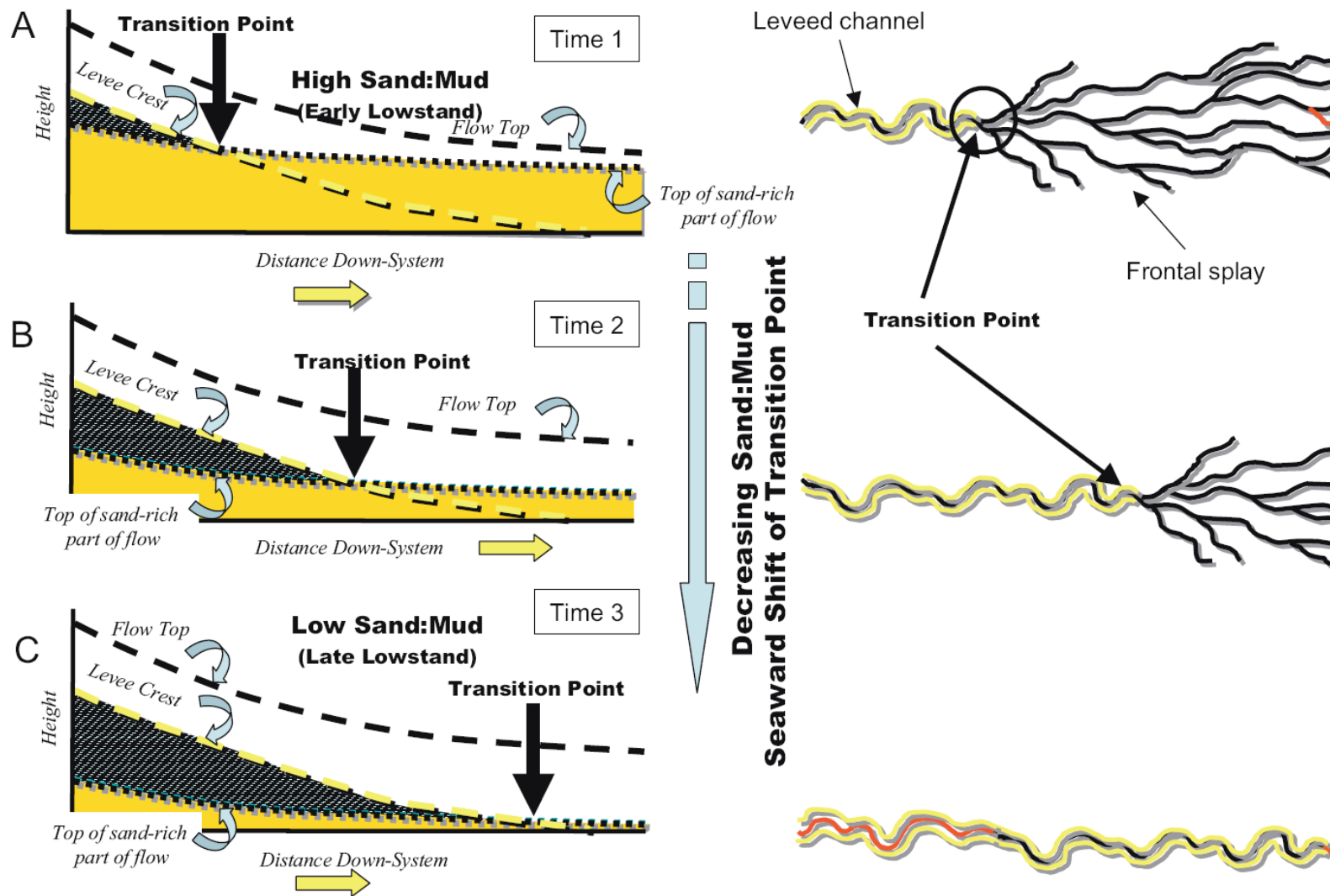


Вид на сейсмическом слайсе зоны с конусами прорыва (crevasse splay).



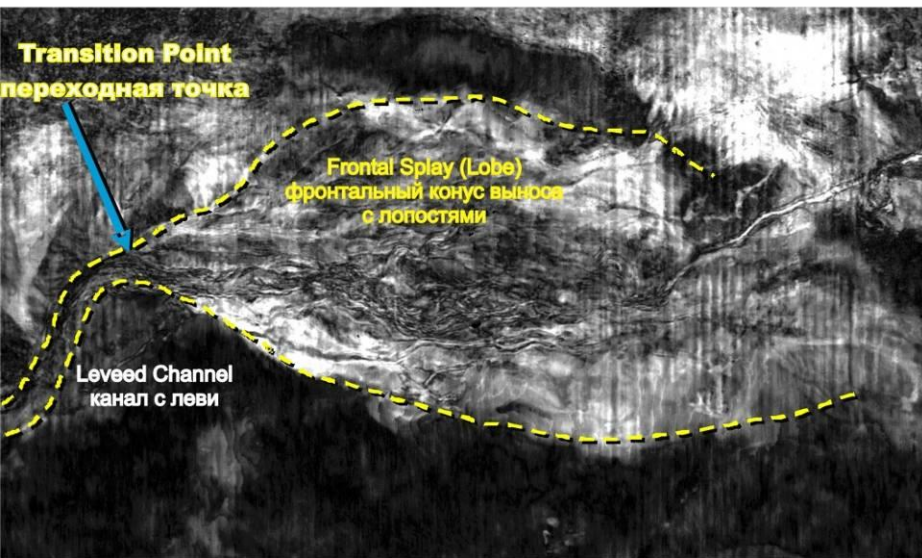
Модель изменения турбидитовой системы вниз по склону (Posamentier, Walker, 2006).

Effective flow height – высота высокоплотной колонны турбидитового потока, levee height – высота леви, total flow height – общая высота колонны высокоплотного и низкоплотного потока, potential overbank sediment supply – зона потенциального привноса осадков за счет овербанка (наложенных сверху дополнительных отложений). Single leveed channel – одиночные канал с леви, sand:mud – соотношения песчаного и глинистого материала в турбидитовом потоке, frontal splay (distributary channel complex) – фронтальный конус выноса с ветвящимся канальным комплексом. Proximal – проксимальные турбидиты, distal – дистальные турбидиты. В точке перехода от канала с леви к фронтальному конусу наблюдается относительно наибольшее количество песчаной фракции.

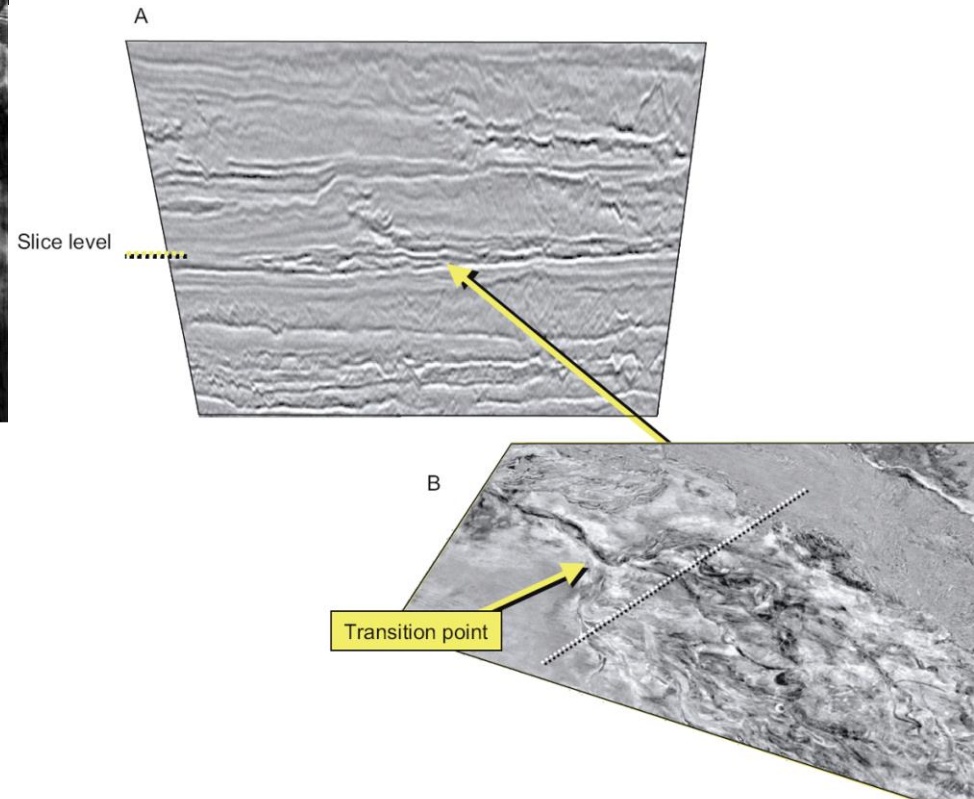


Модели зависимости положения «точки перехода» (transition point) в зависимости от соотношения песчаной и глинистой фракции в турбидитовом потоке. (A) При высоком отношении точка перехода может быть ближе к суше, а при низком – в нижней части склона или вообще отсутствовать (Posamentier, Walker, 2006).

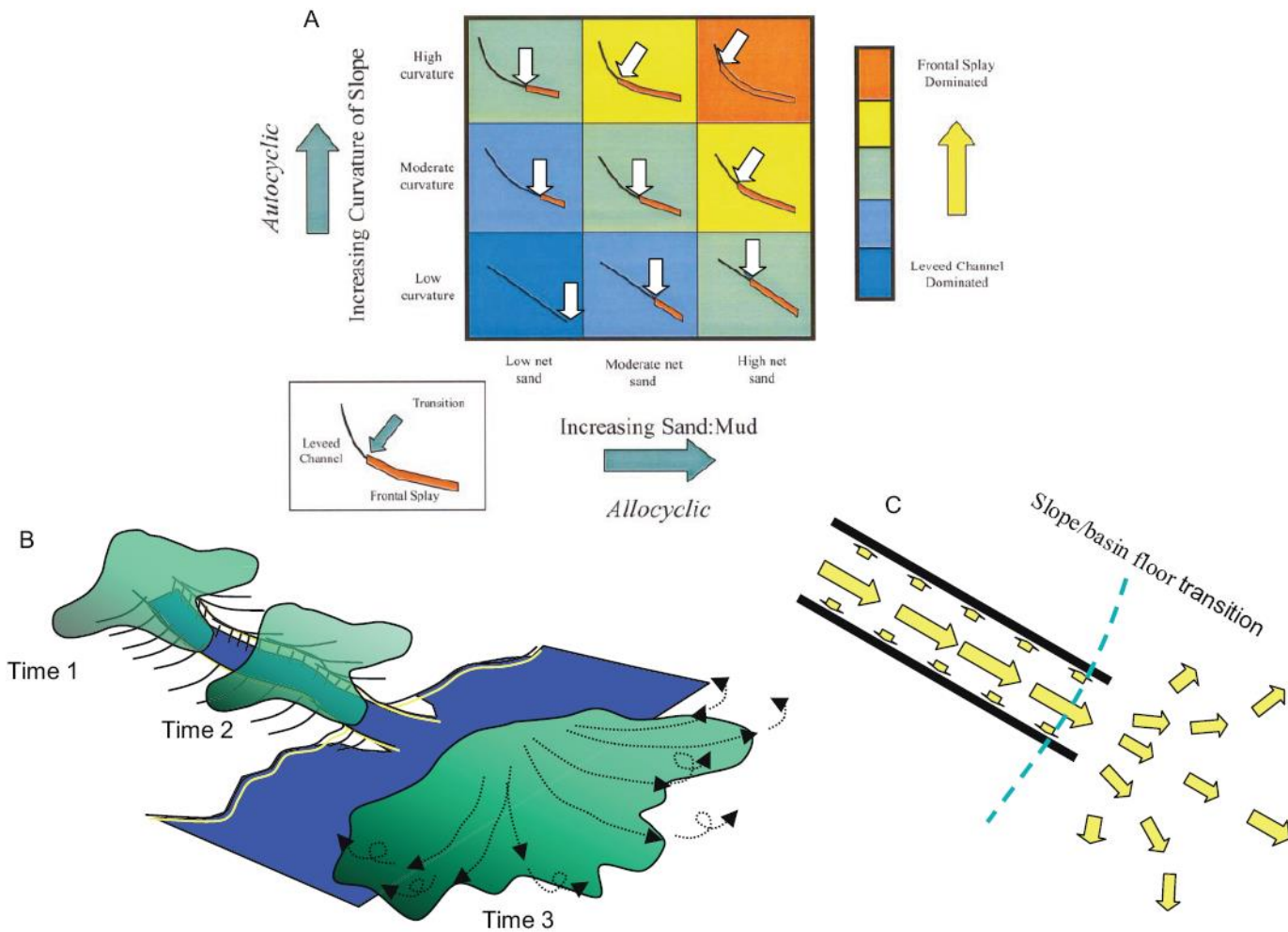
5 km



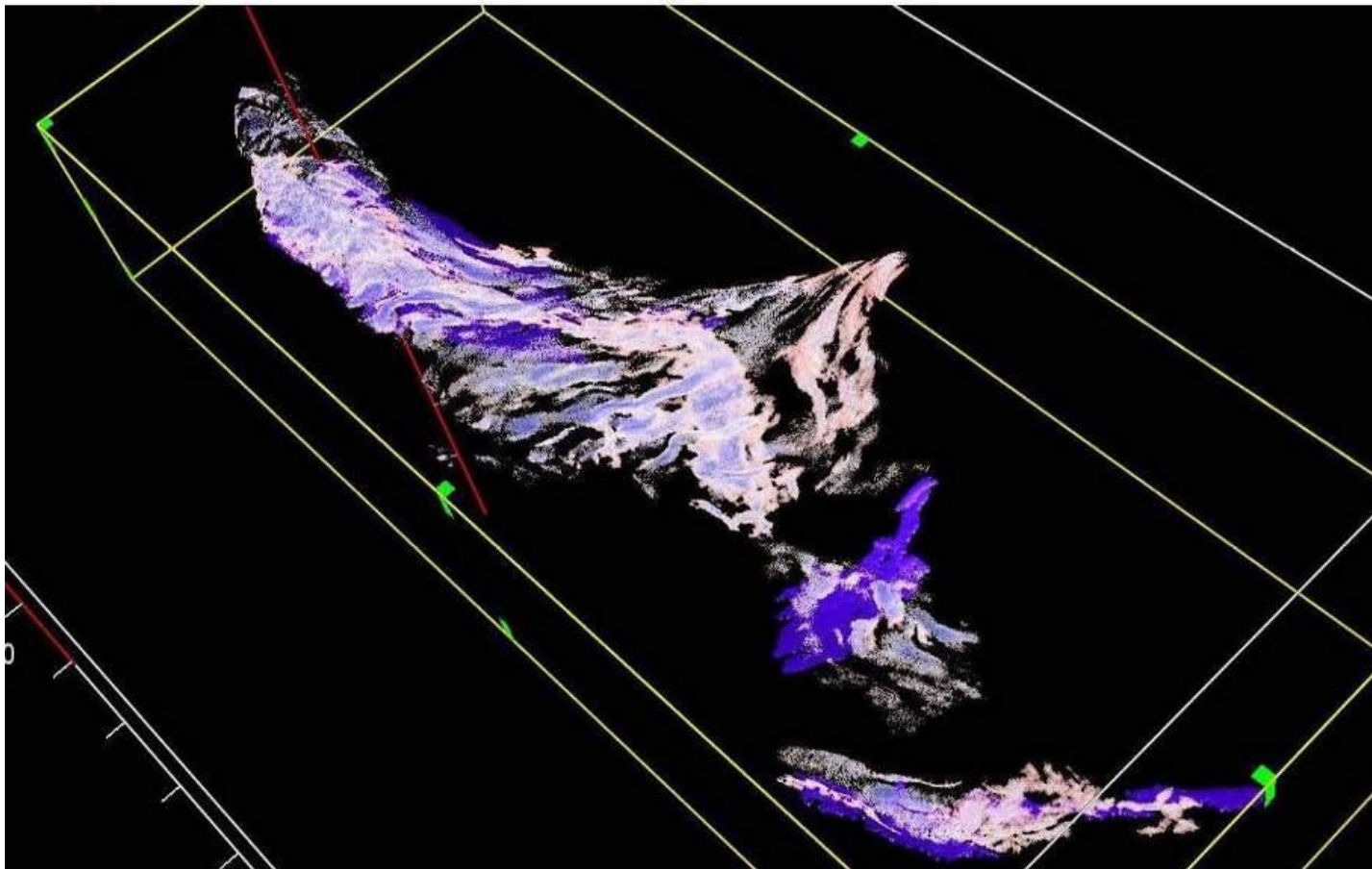
Сейсмический слайс, на котором четко видна переходная точка к фронтальному конусу выноса (Posamentier, Walker, 2006)



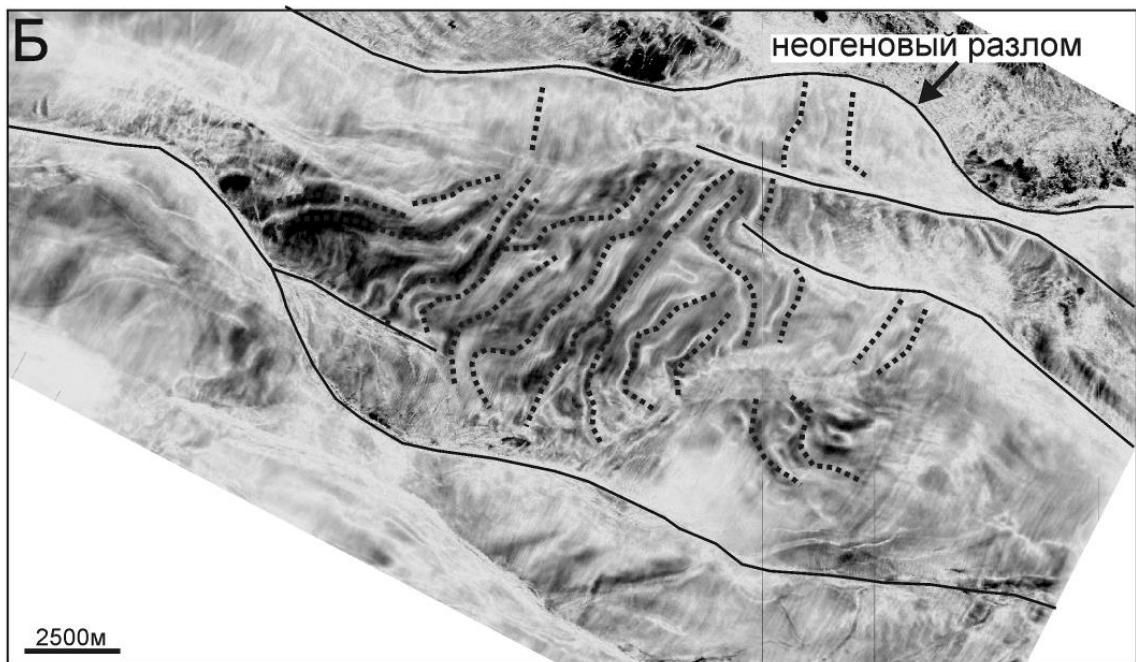
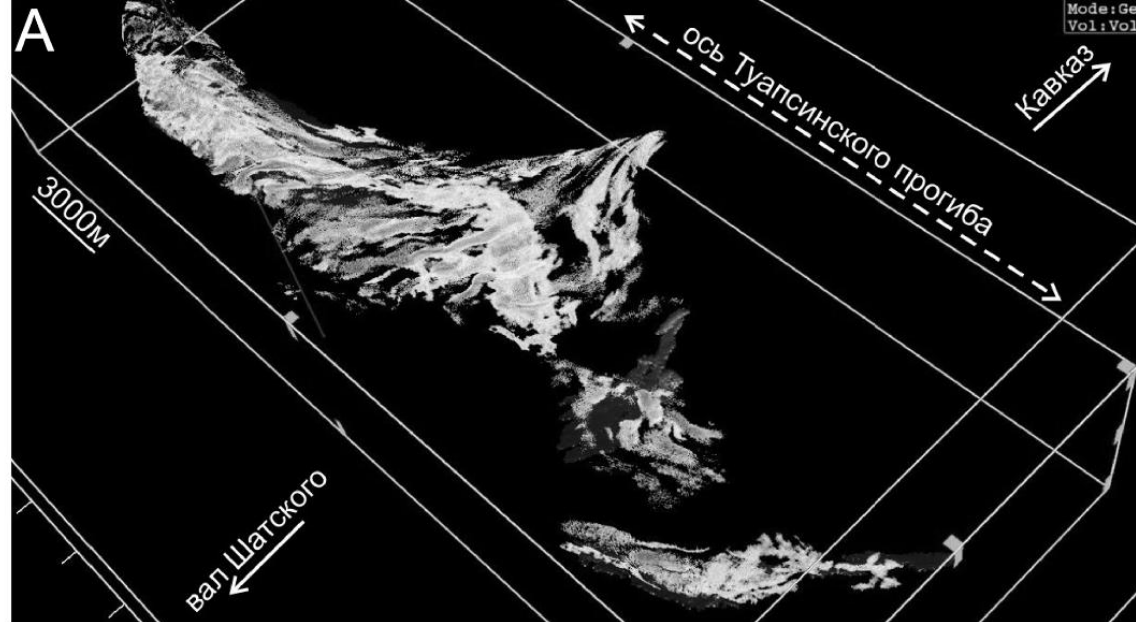
Сейсмический слайс и разрез к нему, показывающие изображение переходной точки (transition point) (Posamentier, Walker, 2006)



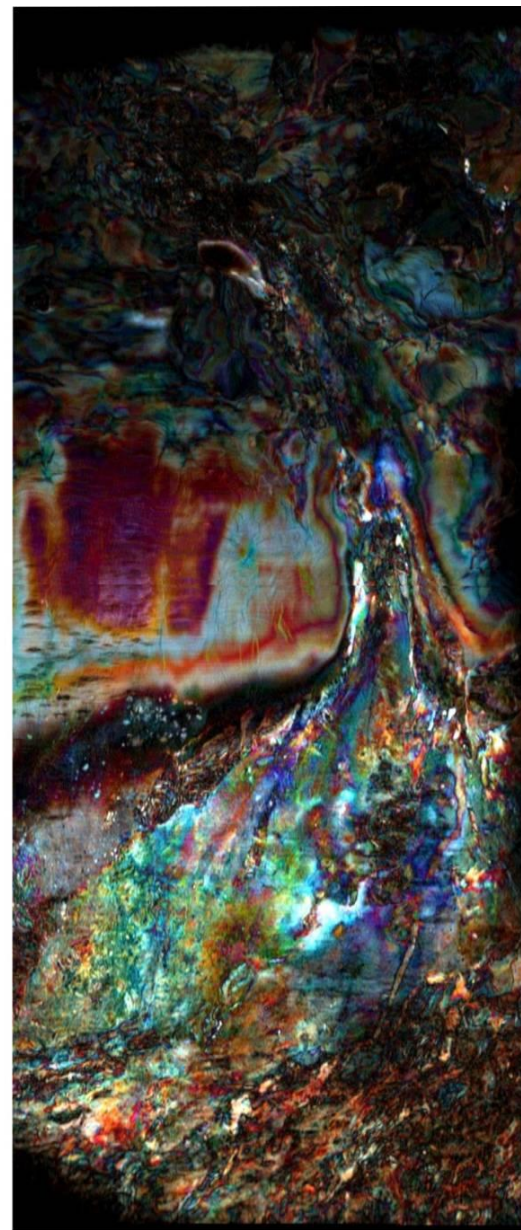
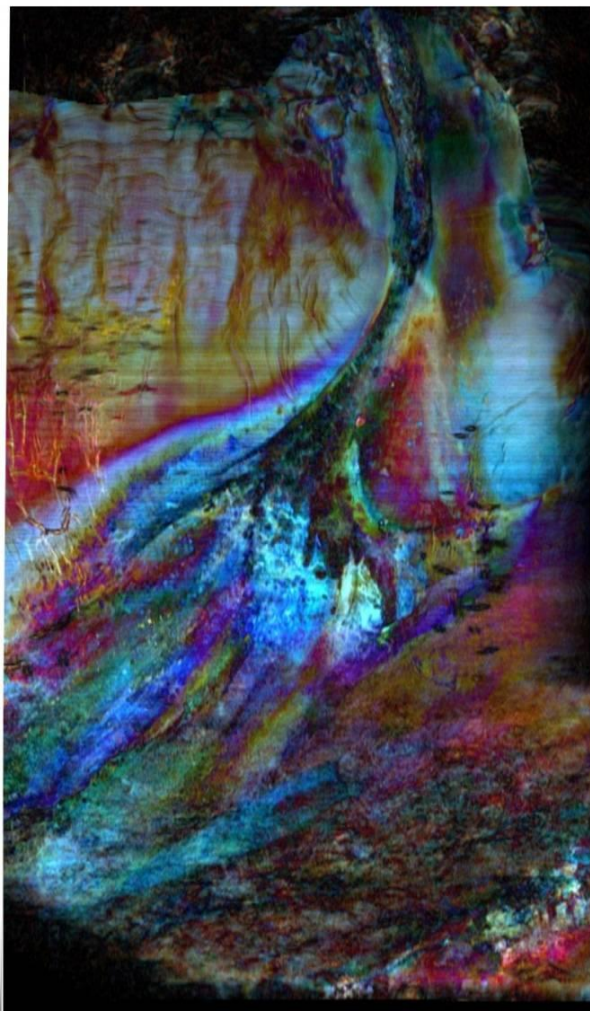
Модели зависимости переходной точки от соотношения песчаной и глинистой фракций в турбидитовом потоке и от изменения кривизны склона. Увеличение кривизны склона ведёт к миграции переходной точки вверх. Увеличение отношения песчаной фракции к глинистой ведет к тому же эффекту. (В). Переход турбидитного потока от канала с леви в дно бассейна. (С). При достижении дна бассейна латерально (в разные стороны) направленные векторы движения резко увеличиваются. Это приводит к отложениям конуса выноса на дне. Неожиданные препятствия турбидитовому потоку на склоне могут приводить к изменениям положения переходной точки (Posamenrier, Walker, 2006)



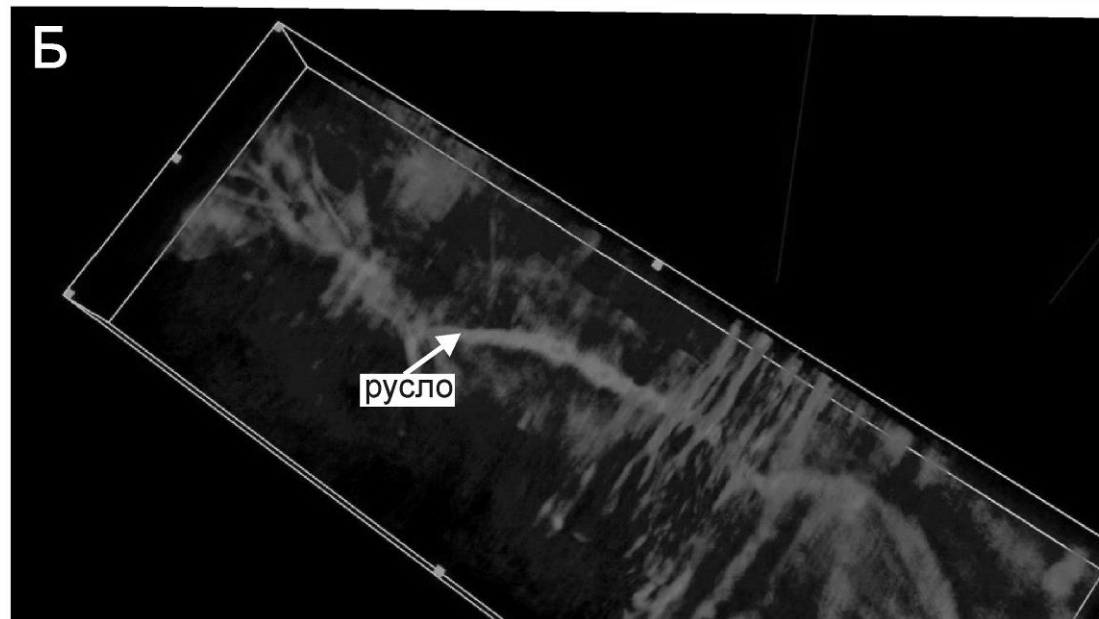
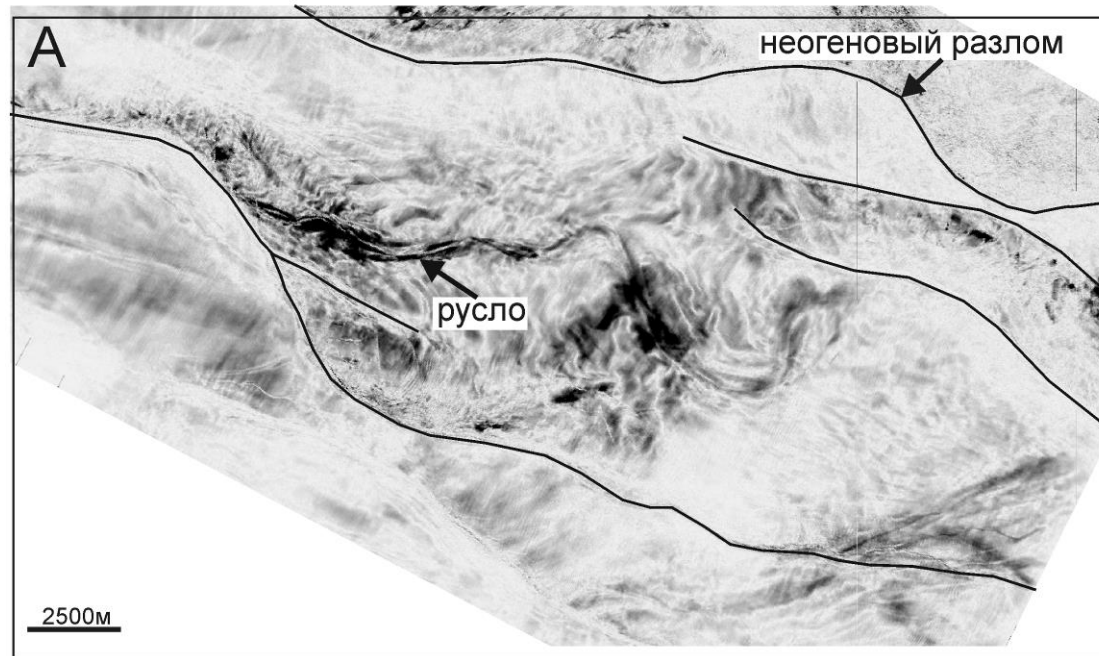
Пример 3Д сейсмического изображения переходной точки и конуса выноса для отложений майкопа Туапсинского прогиба в Черном море (Митюков и др., 2011, 2012)



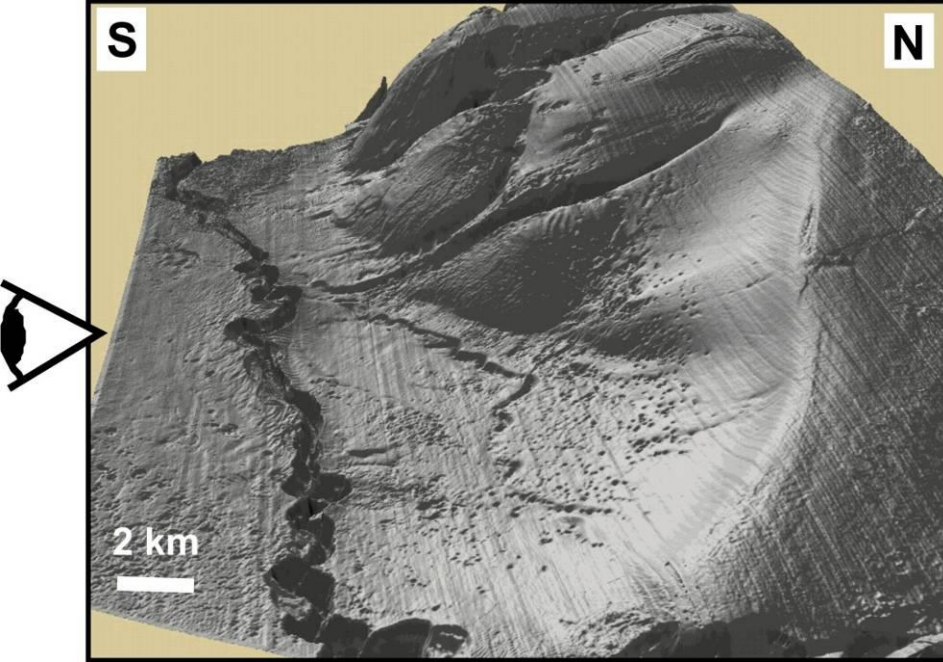
Турбидитовая система поперёк Туапсинскому прогибу с конусом выноса
3Д визуализация и слайс со спектральной декомпозицией (Митюков и др., 2012)



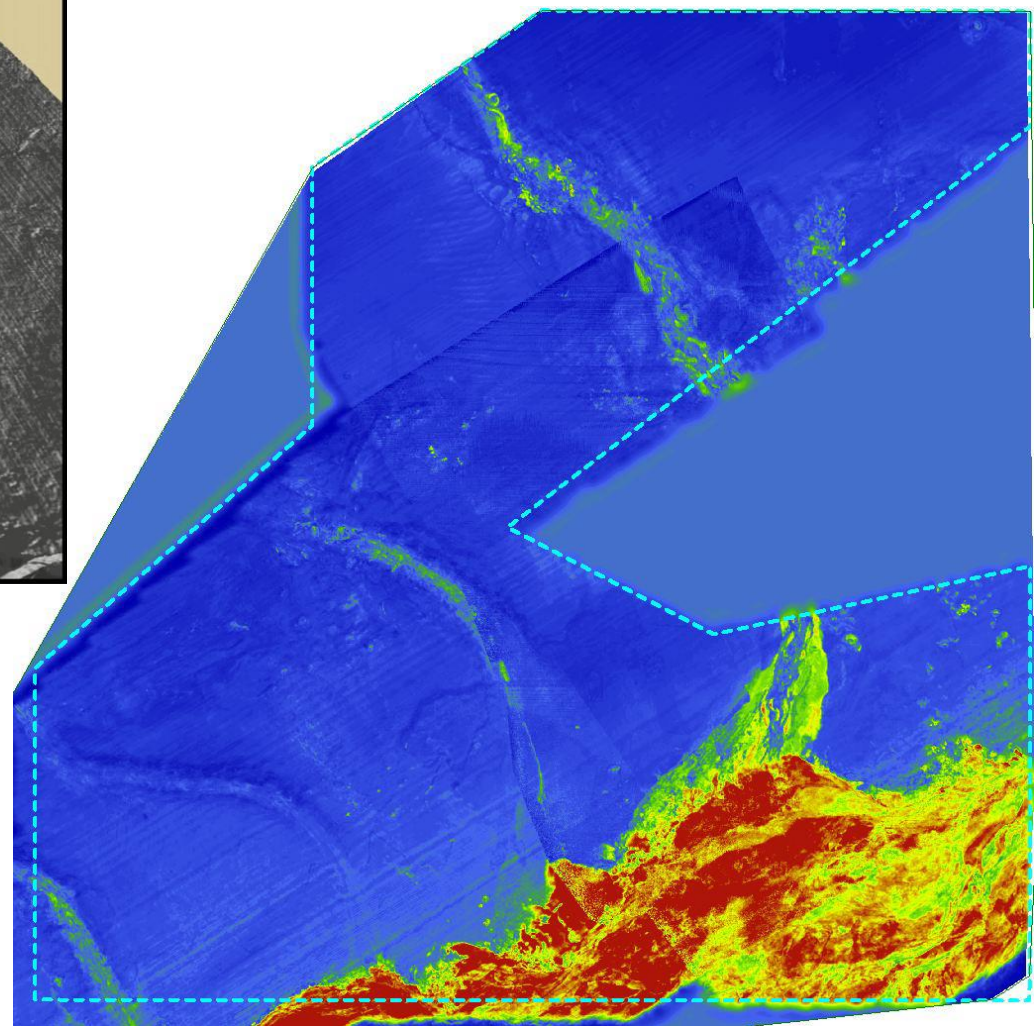
Примеры положения переходной точки для канала дельты Нигера (блок «Т», канал Северный).



Пример меандрирующего канала, проходящего вдоль трога краевого Туапсинского прогиба. Не ясно, есть ли система «леви» (Митюков и др., 2012)



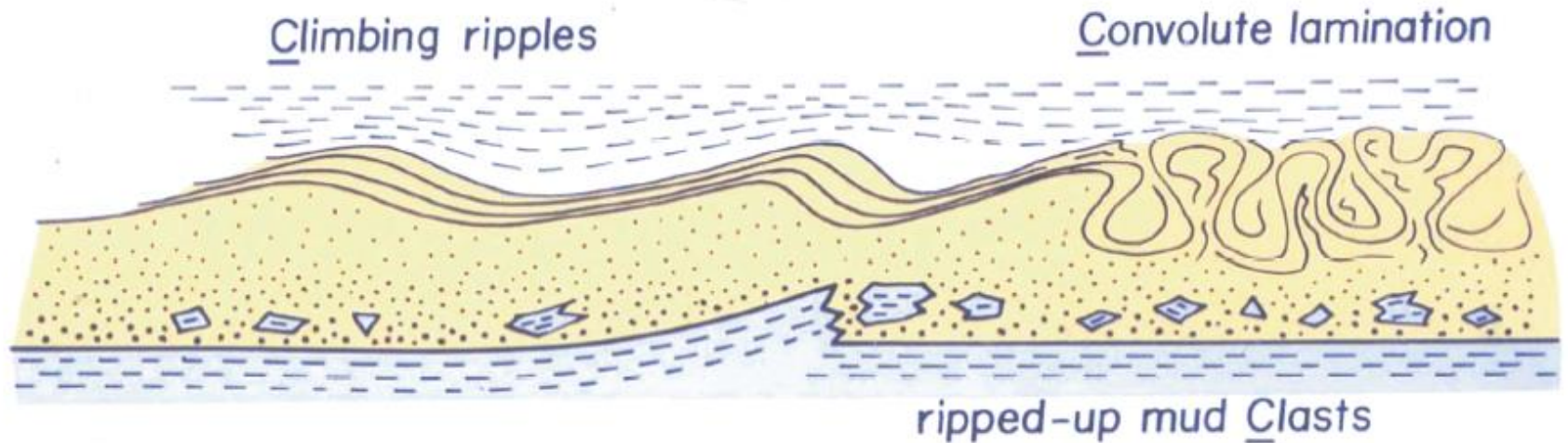
Блок-диаграмма рельефа дна подножья дельты Нигера в районе месторождения Зафиро. Хорошо виден продольный канал с системой «леви»



Карта RMS-аномалий для рельефа дна подножья дельты Нигера. Блок «Т». Продольный склону канал является системой канал-леви, показанной выше. Данный канал активен в настоящее время, склоновые каналы Почти все являются отмершими

A

"CCC - TURBIDITE"



B

THIN-BEDDED TURBIDITE

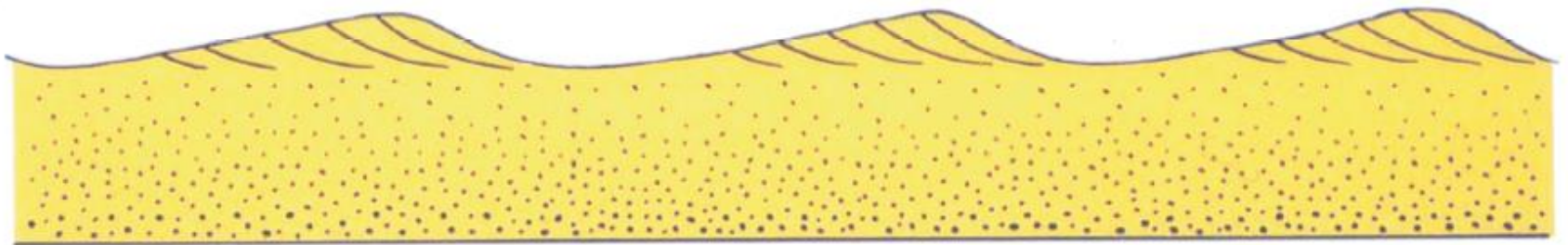
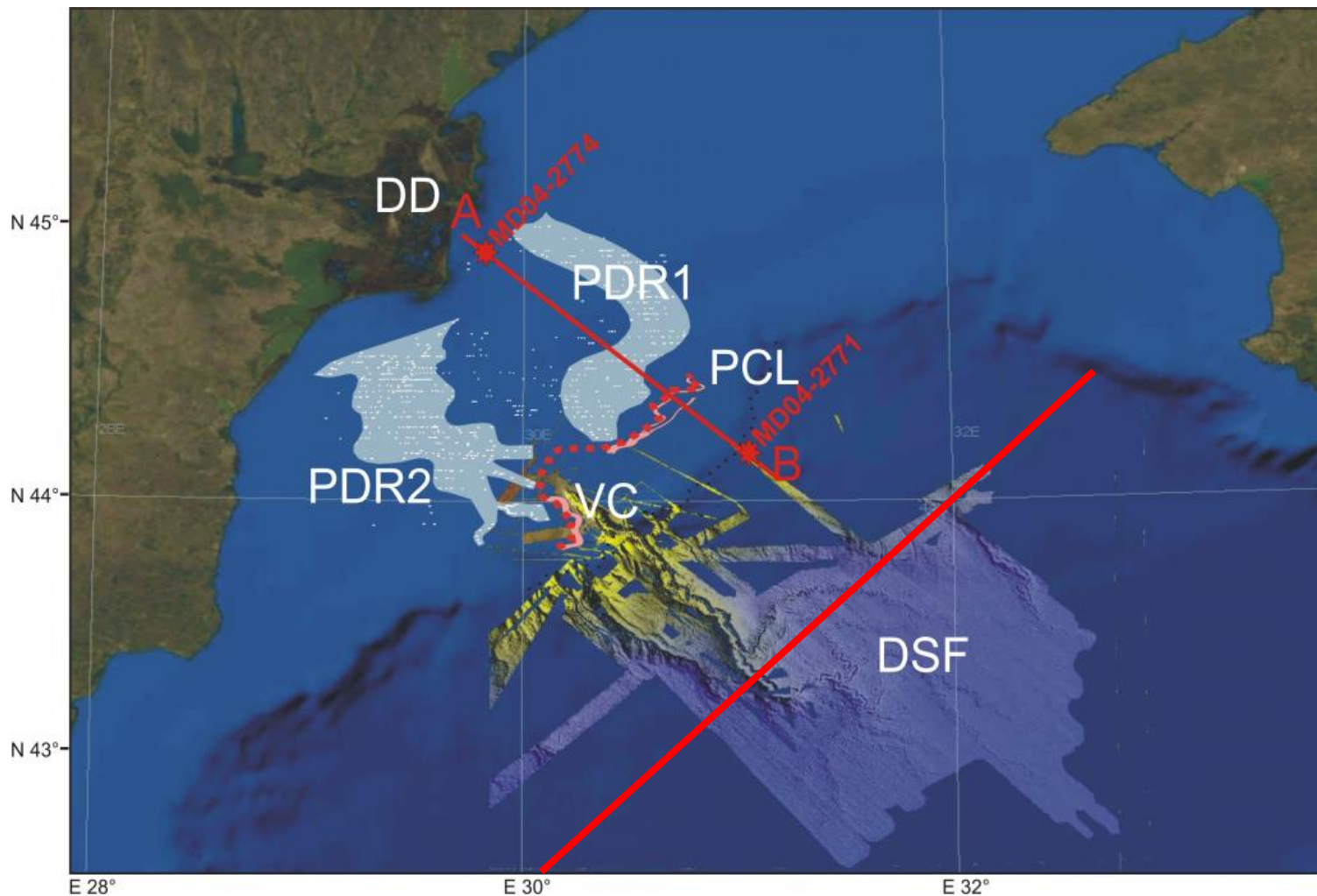
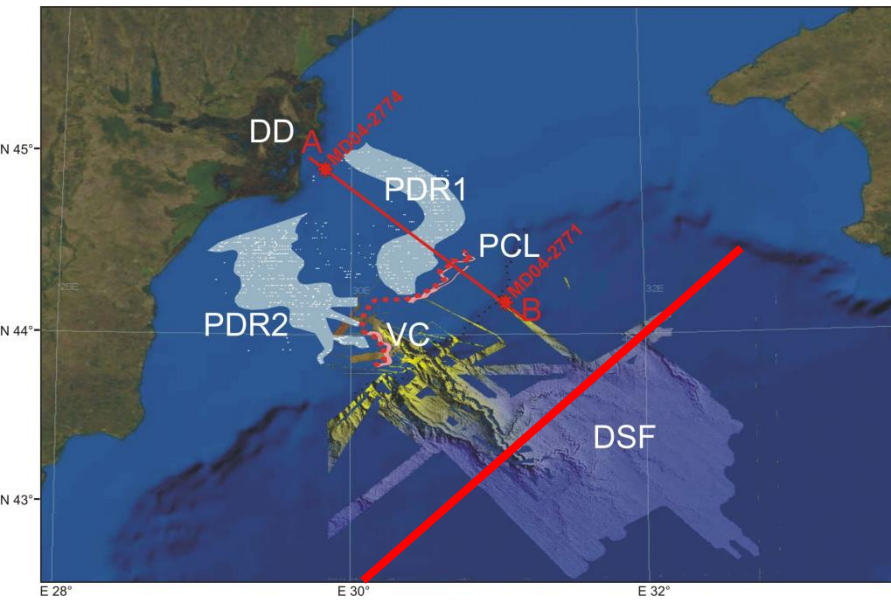


Диаграмма показывающая два типа тинкослоистых турбидитов. Для типа "ССС" типичны climbing ripples (восходящая волновая рябь), конволютная слоистость и разорванные класты глин. Для второго типа характерна косая слоистость. Тип "ССС" больше типичен для отложений леви, а второй – для дистальной части отложений конусов выноса на бассейновом дне (Posamentier, Walker, 2006).

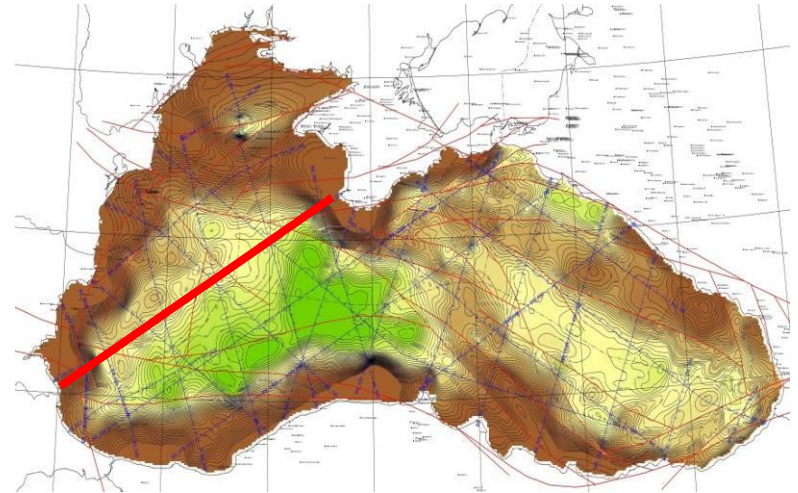
Детали строения дистальной части дельты Дуная



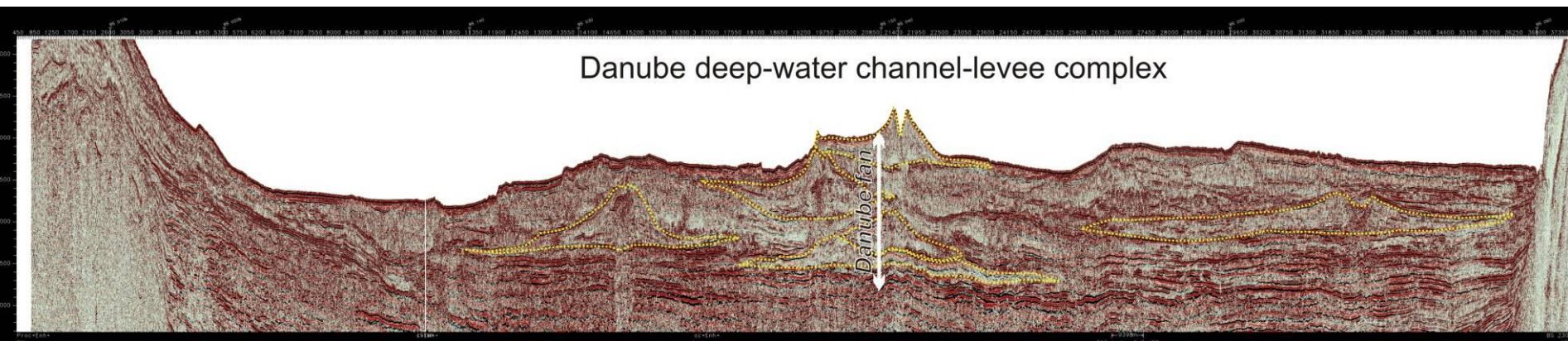
Турбидитовый комплекс с каналами и леви



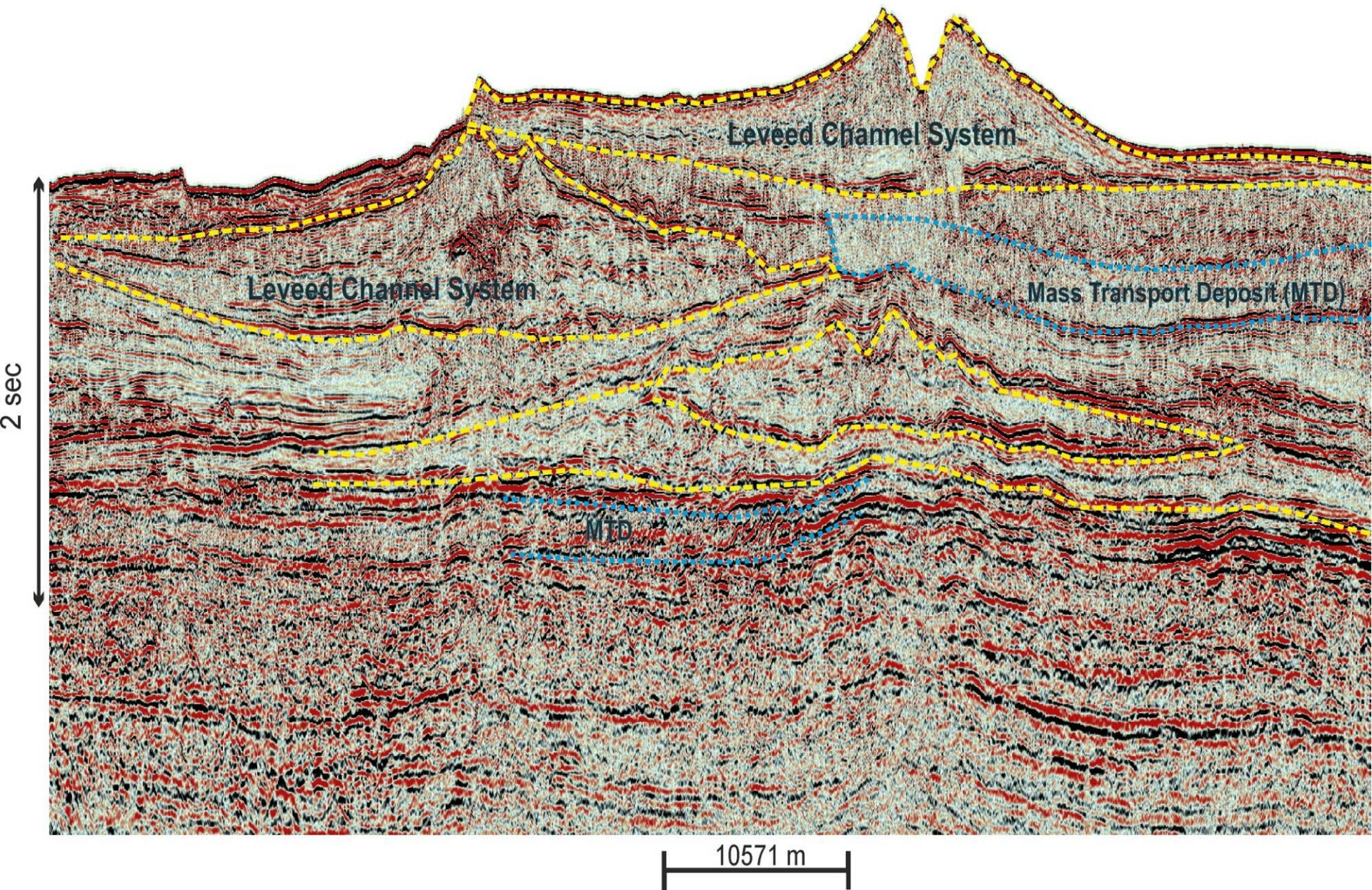
Lericolas et al., 2007, 2010

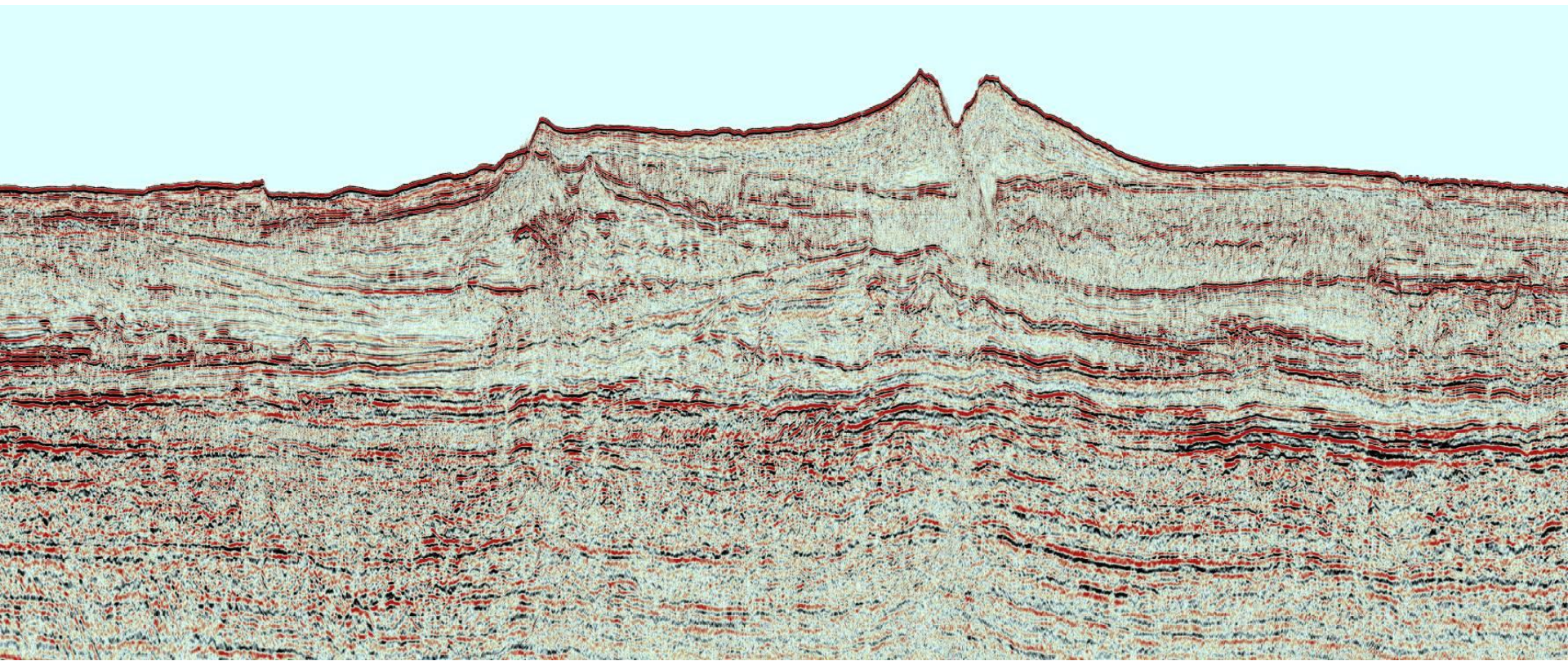


BS-230

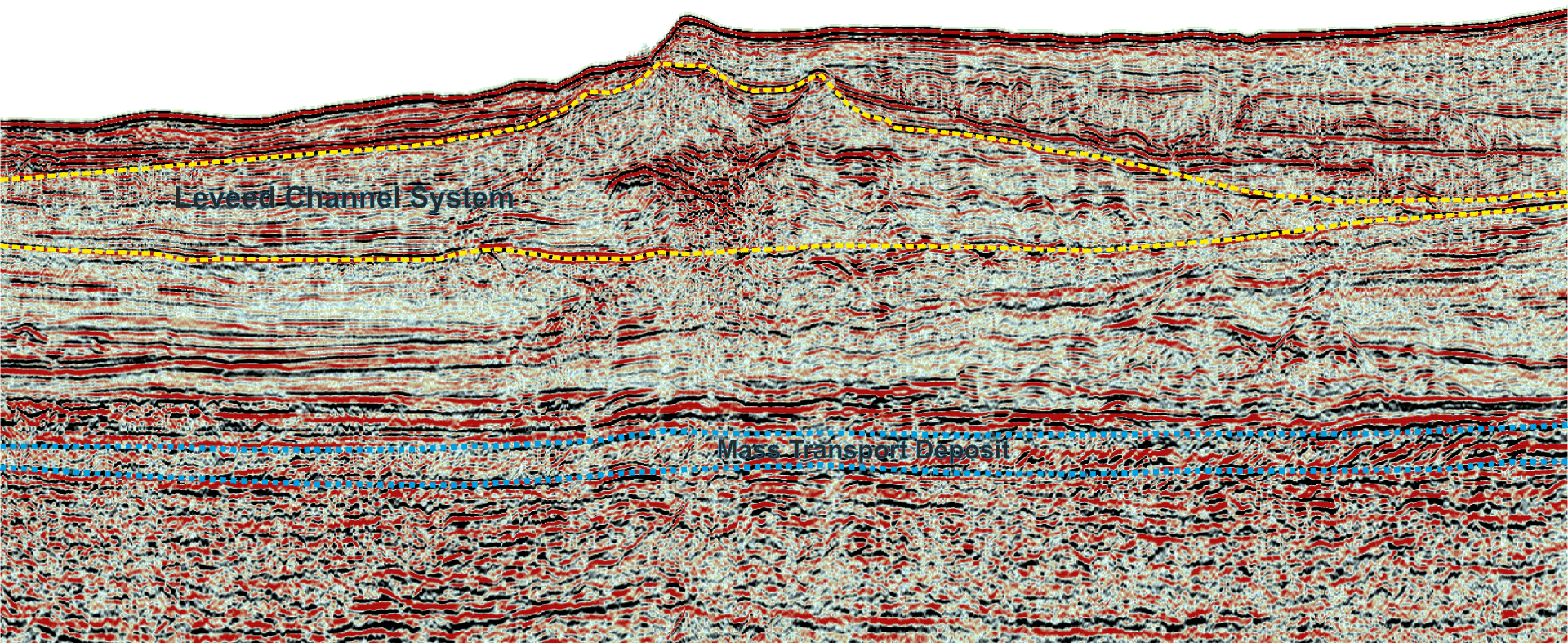


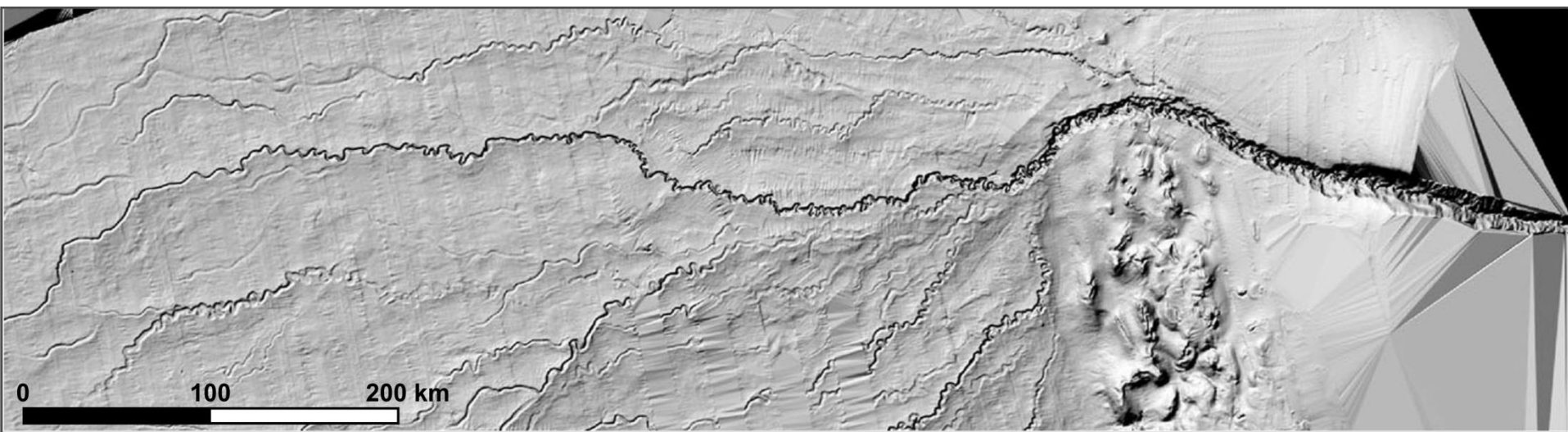
Турбидитовые каналы и леви (насыпные дамбы
образованные турбидитовым материалом из турбидитового «облака»)



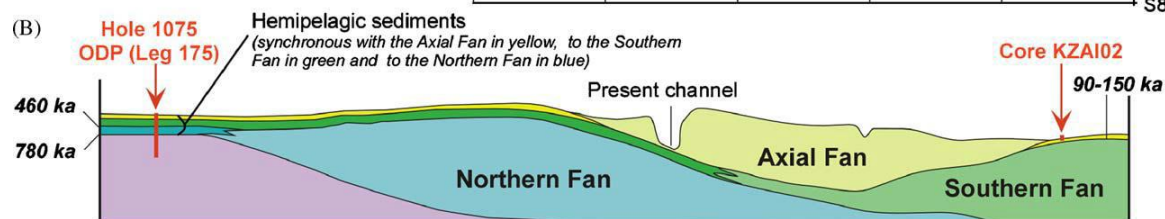
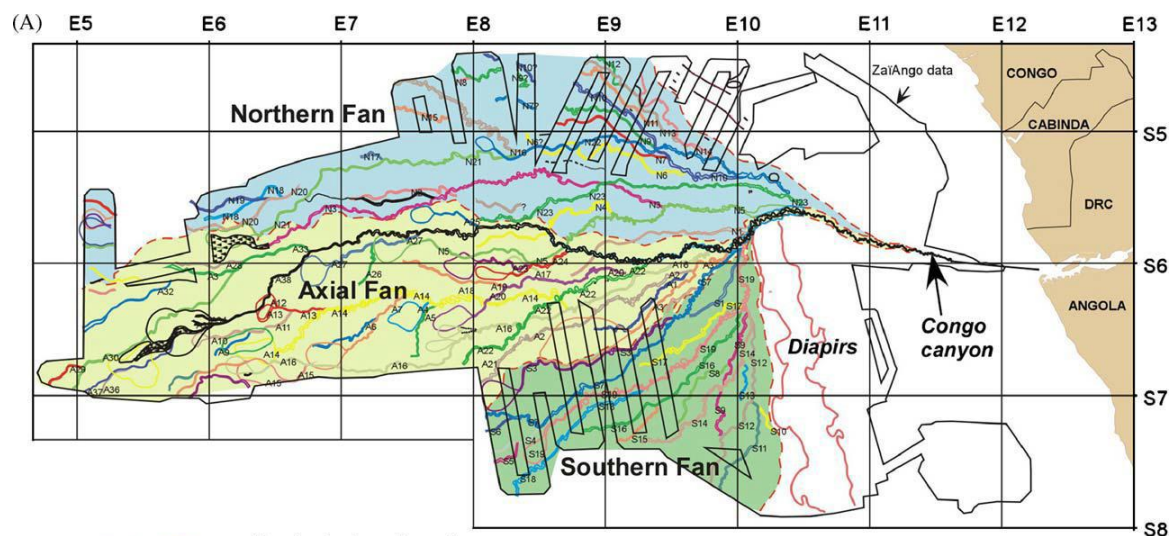


Захороненные системы канал-леви





(Babonneau, 2002)

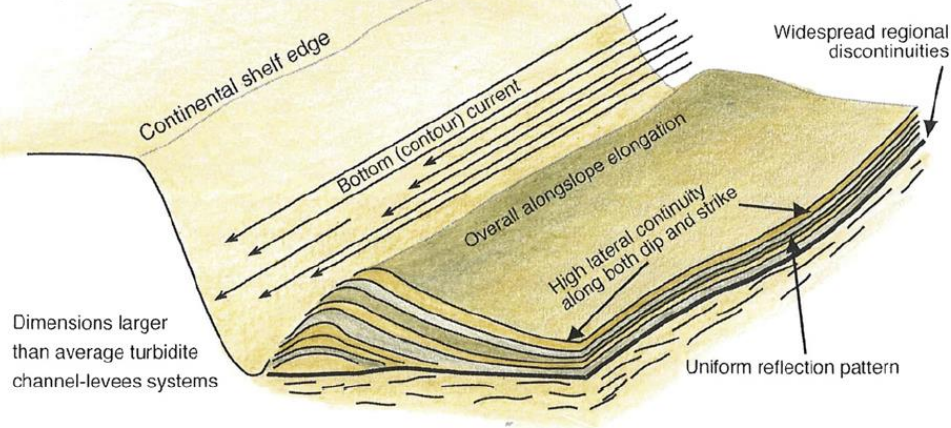


Контуриты

Контуры, сравнение с турбидитами

Elongated contourite drift (contourites)

Asymmetric moat and mound geometry



Channel levee system (turbidites)

Symmetric gull-wing geometry (asymmetry controlled by Coriolis force)

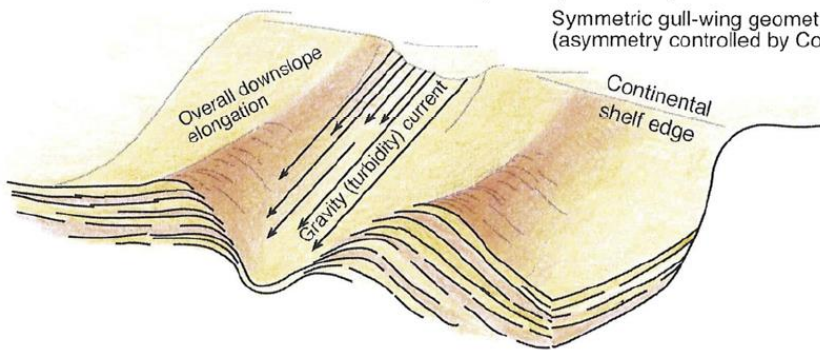


Fig. 3. Schematic model showing ideal, large-scale differences between contourite drifts and channel-levee systems. Modified from work by Rebesco (2005); with permission from Elsevier.

M. Rebesco et al. / Marine Geology 352 (2014) 111–154

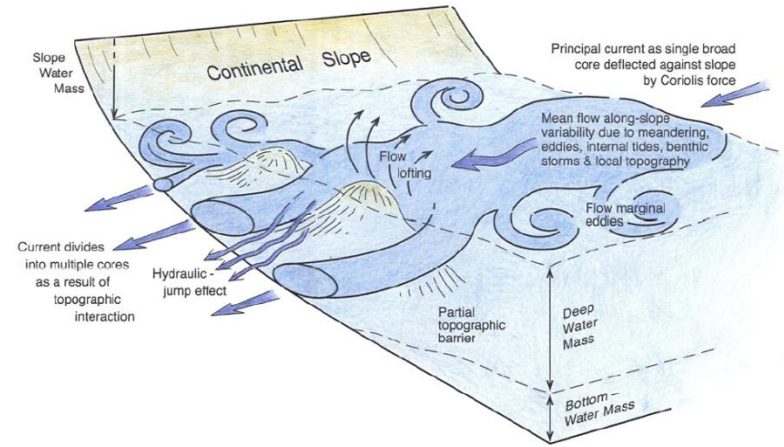


Fig. 2. Schematic diagram summarizing the principal bottom-current features. Modified from work by Stow et al. (2008); with permission from Elsevier.

112

M. Rebesco et al. / Marine Geology 352 (2014) 111–154

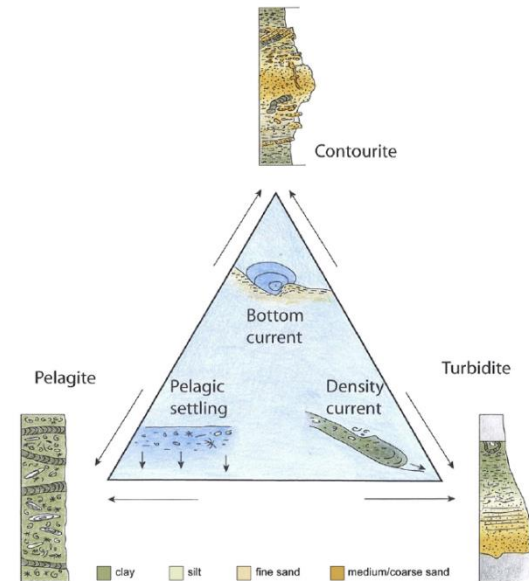
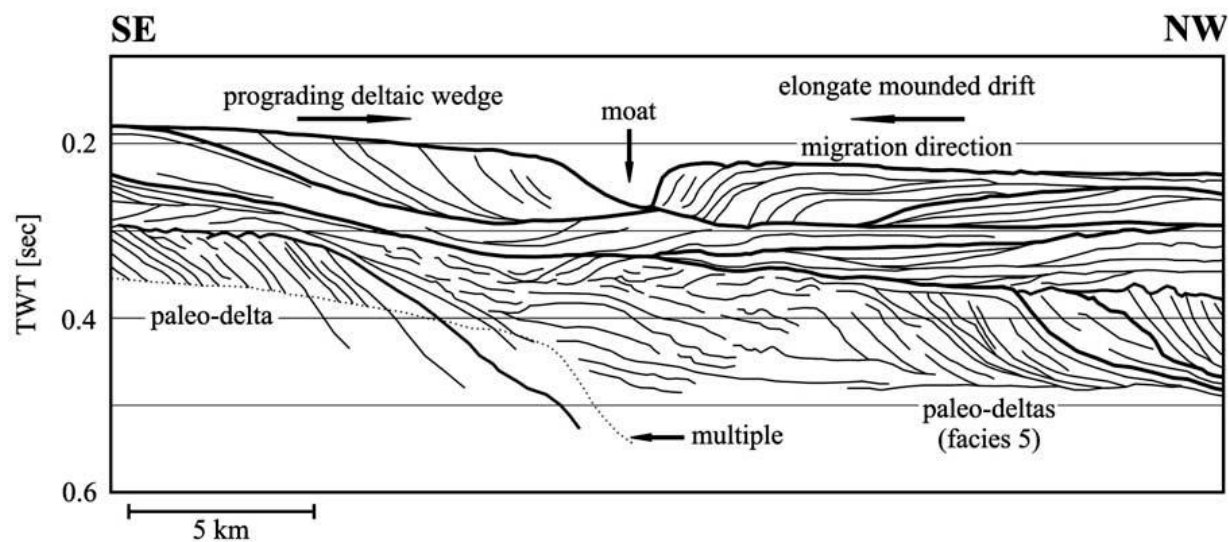
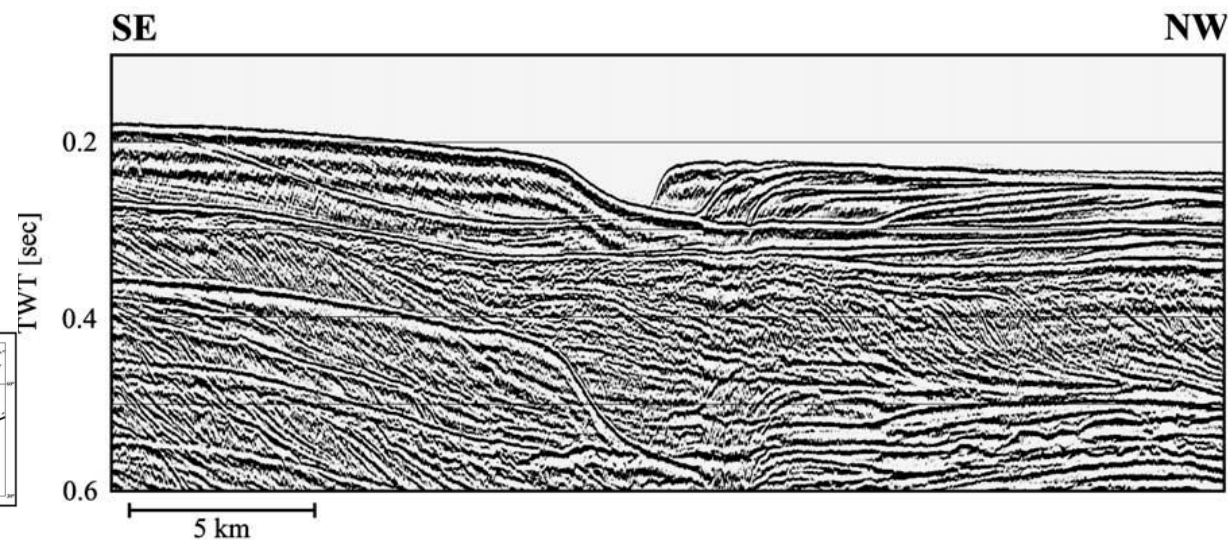
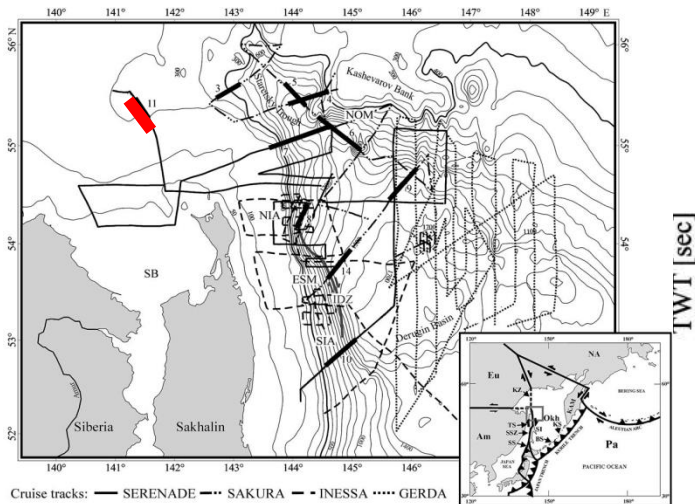


Fig. 1. Conceptual diagram showing the three main types of sedimentary processes operating in the deep sea (within the triangle) and the facies model of the respective depositional products.



H.K. Wong et al. / Marine Geology 201 (2003) 287–305

Fig. 11. Part of profile Se11, SERENADE cruise, with interpreted section, showing an elongate mound on the slope north of Sakhalin Island. It progrades upslope, the direction in which the dip of the internal reflectors at its frontal zone gradually increases. The drift body is underlain by downslope-prograding lowstand deltaic wedges (seismic facies 5). See Fig. 1 for profile location.

Вид на сейсмических профилях

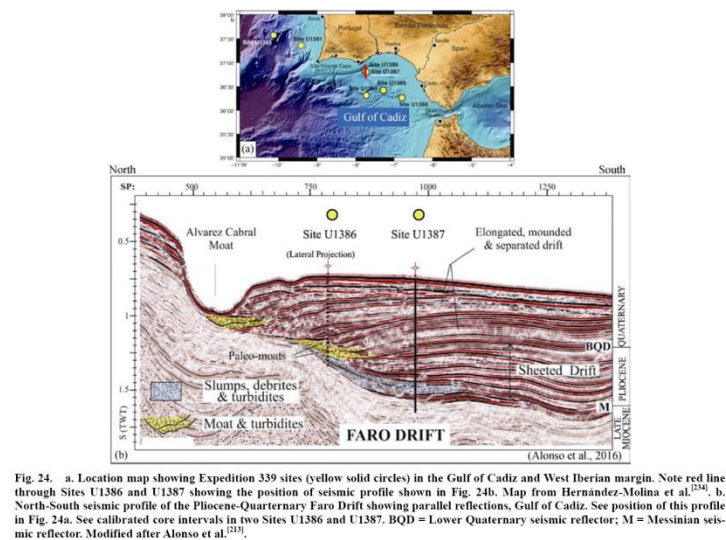
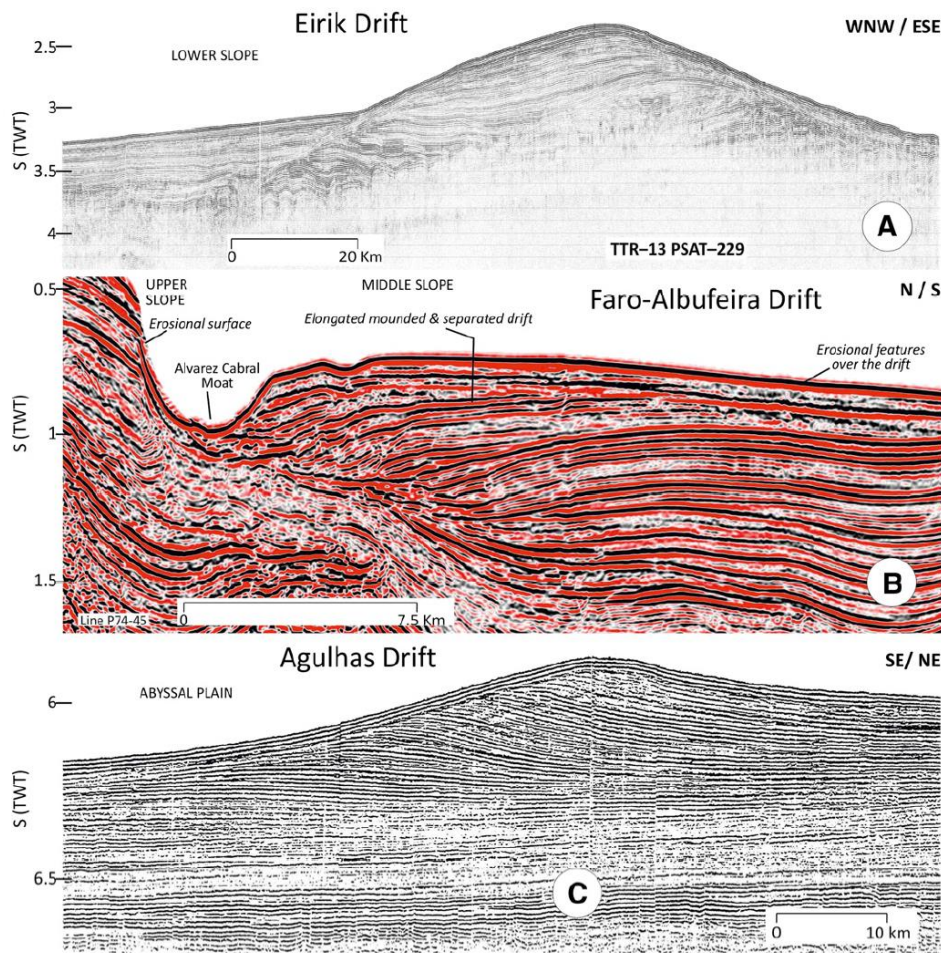


Fig. 24. a. Location map showing Expedition 339 sites (yellow solid circles) in the Gulf of Cádiz and West Iberian margin. Note red line through Sites U1386 and U1387 showing the position of seismic profile shown in Fig. 24b. Map from Hernández-Molina et al. (2014). b. North-South seismic profile of the Pliocene-Quaternary Faro Drift showing parallel reflections, Gulf of Cádiz. See position of this profile in Fig. 24a. See calibrated core intervals in two Sites U1386 and U1387. BQD = Lower Quaternary seismic reflector; M = Messinian seismic reflector. Modified after Alonzo et al. (2016).

Fig. 10. Examples of three large contourite drifts: A) Eirik Drift, Greenland margin, northern hemisphere; B) Faro-Albufeira Drift, Gulf of Cádiz margin, northern hemisphere (Llave et al., 2001; Brackenridge et al., 2013; Stow et al., 2013a. Seismic line provided by REPSOL Oil for this work); and C) Agulhas Drift, Transkei Basin, southern hemisphere. Panel A: from Hunter et al. (2007b) and Hernández-Molina et al. (2008b); with permission from Elsevier; Panel C: Niemi et al. (2000), with permission from Elsevier.

Вид на сейсмических профилях

H. Li et al. / *Marine and Petroleum Geology* 43 (2013) 370–380

375

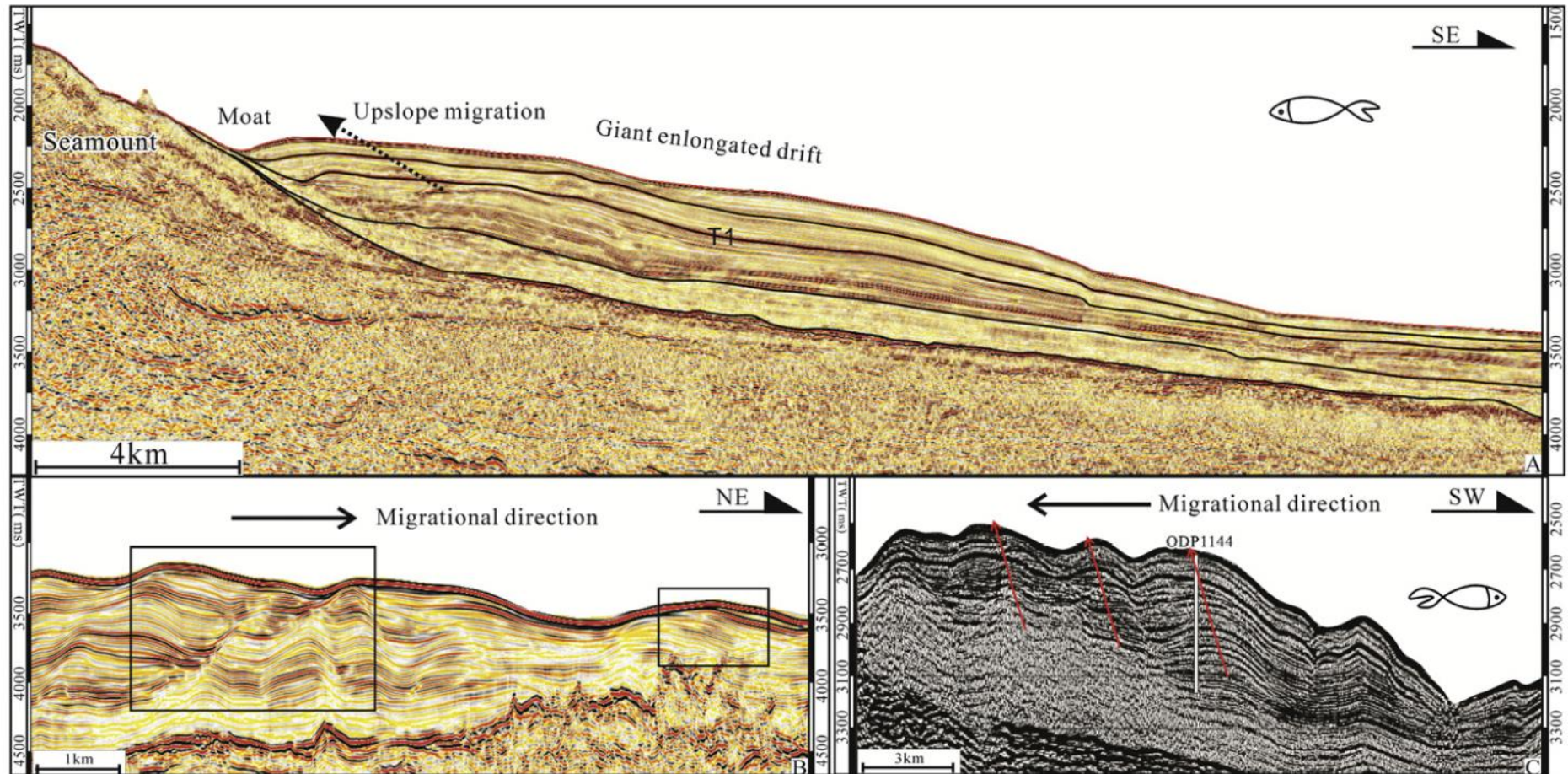


Figure 5. Giant elongated drift in southern Dongsha Islands. A: Mounded, parallel to subparallel, moderate to low, low continuity seismic reflection. Note converging feature in the moat, upslope migration. B and C: NE-migrating characteristic, wavy seismic reflection (C from Wang et al., 2003; Shao et al., 2001; modified). See Figure 2 for profiles locations.

Вид в обнажениях

M. Rebesco et al. / Marine Geology 352 (2014) 111–154

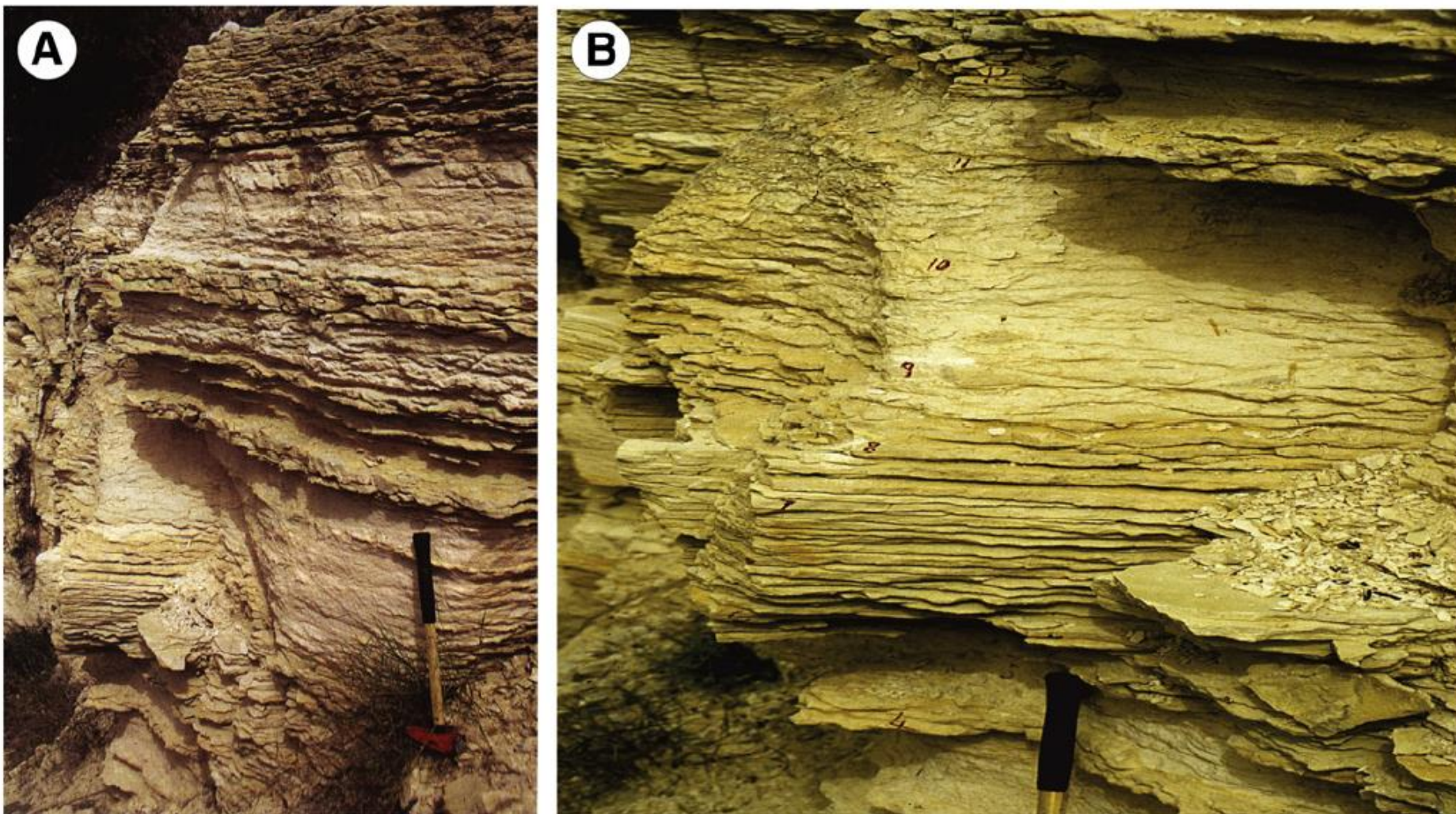


Fig. 11. Ancient contourite outcrops (A & B) of the Lefkara Formation, Cyprus (courtesy of D.A.V. Stow, Heriot-Watt University, UK).

Модель глубоководной системы седimentации с контурирами

M. Rebesco et al. / Marine Geology 352 (2014) 111–154

123

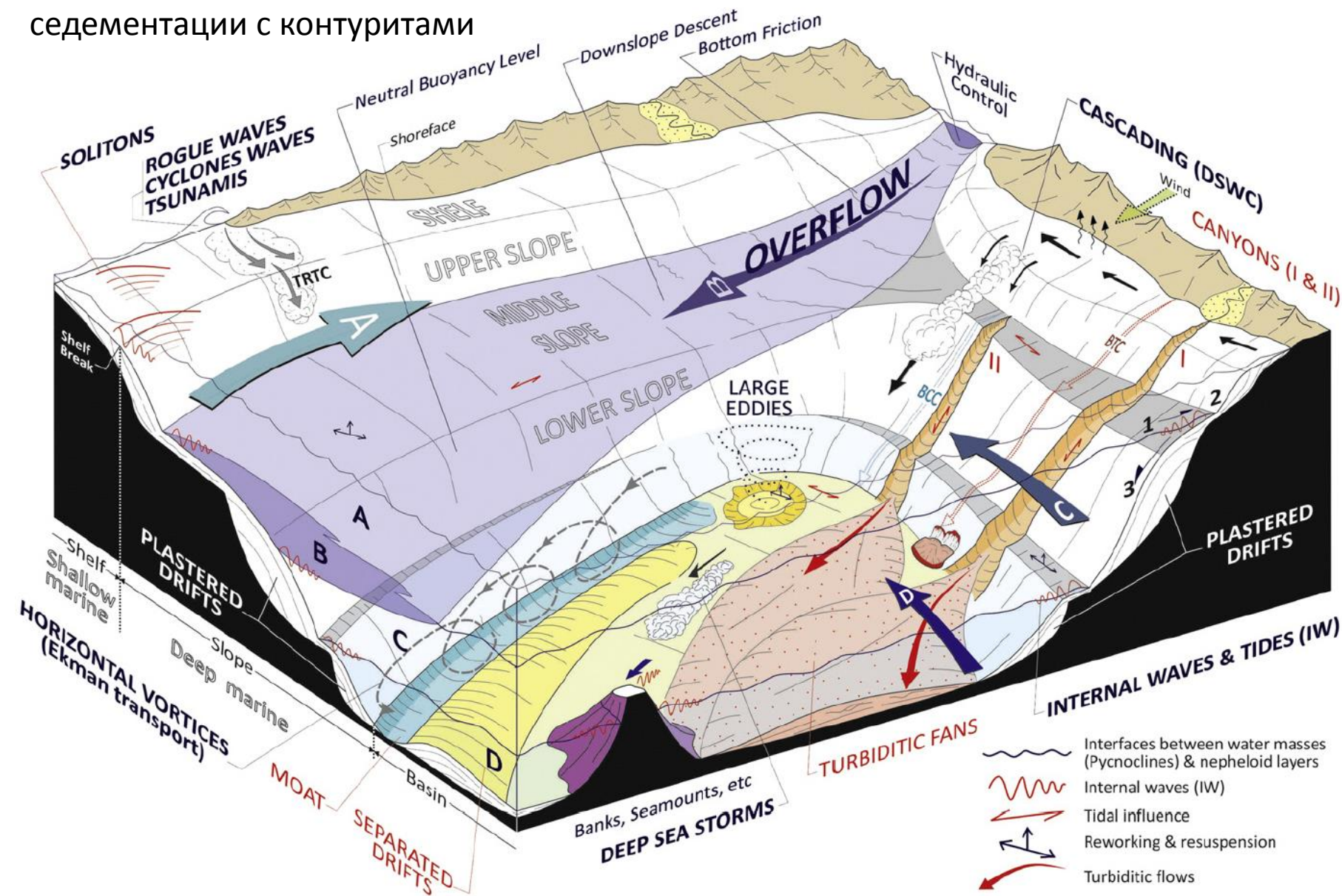
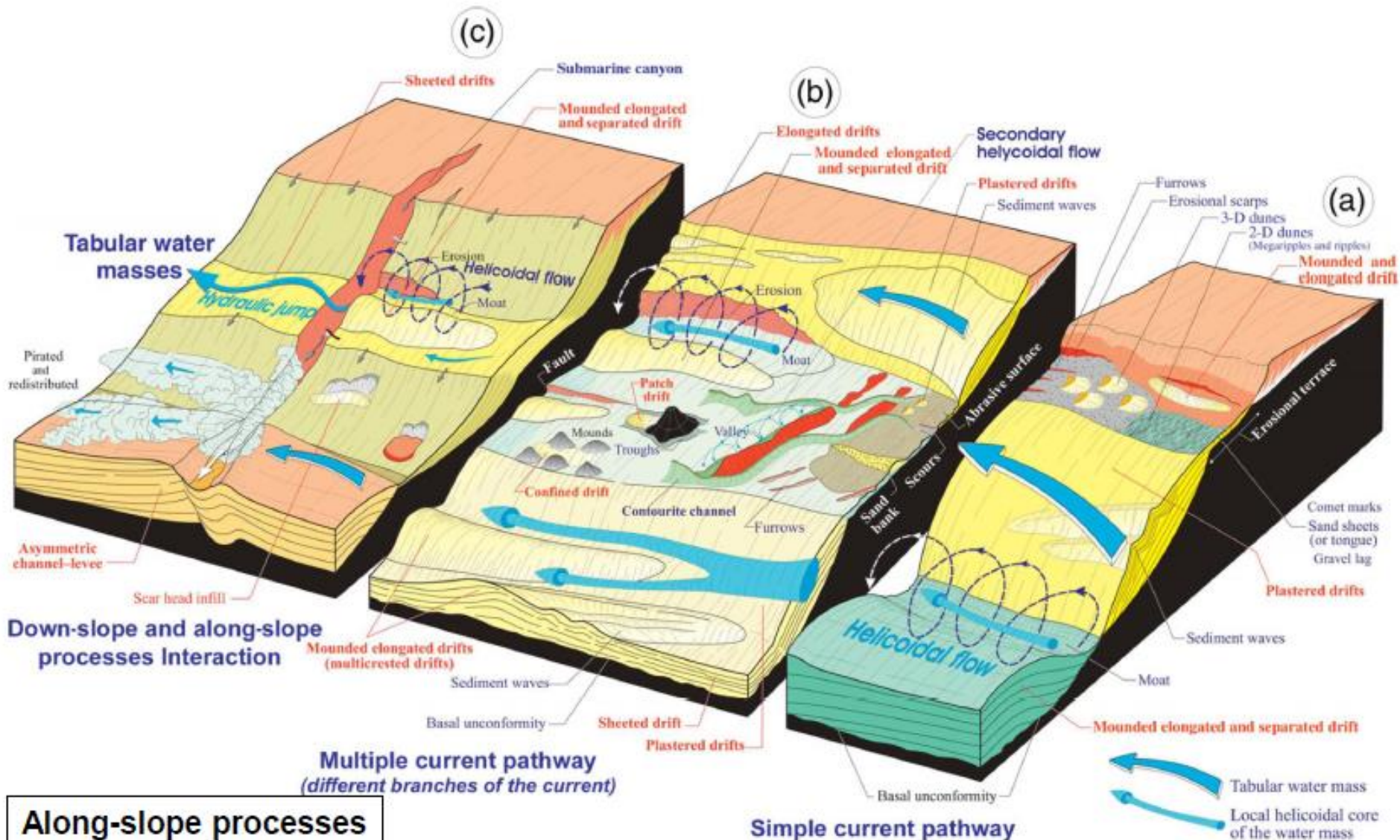


Fig. 13. 3D sketch depicting the possible oceanographic processes in deep-water environments. The velocity at the seafloor can be affected by density currents and overflows, as well as by barotropic currents and by intermittent processes such as cascading, giant eddies, deep sea storms, vortices, internal waves, internal tides, tsunamis, cyclone waves, and rogue waves (for further explanations, see text).

Contourite depositional model



Along-slope processes
-Contour current driven erosion and deposition

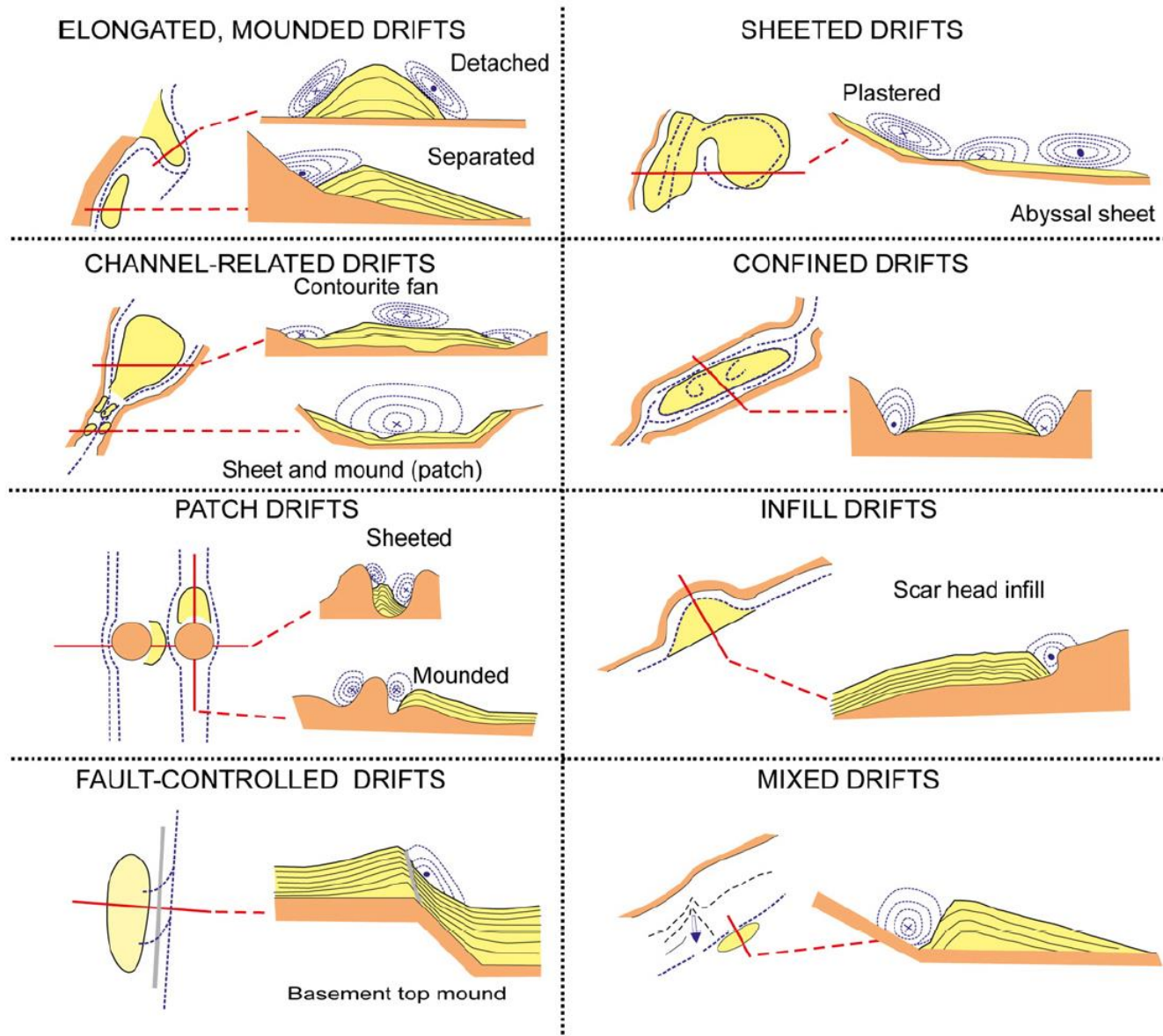


Fig. 16. Sediment drift types and inferred bottom-current paths. Modified from work by Rebesco (2005), and by Hernández-Molina et al. (2008b), with permission from Elsevier. The original classification was adapted from Rebesco and Stow (2001) and Stow et al. (2002a).

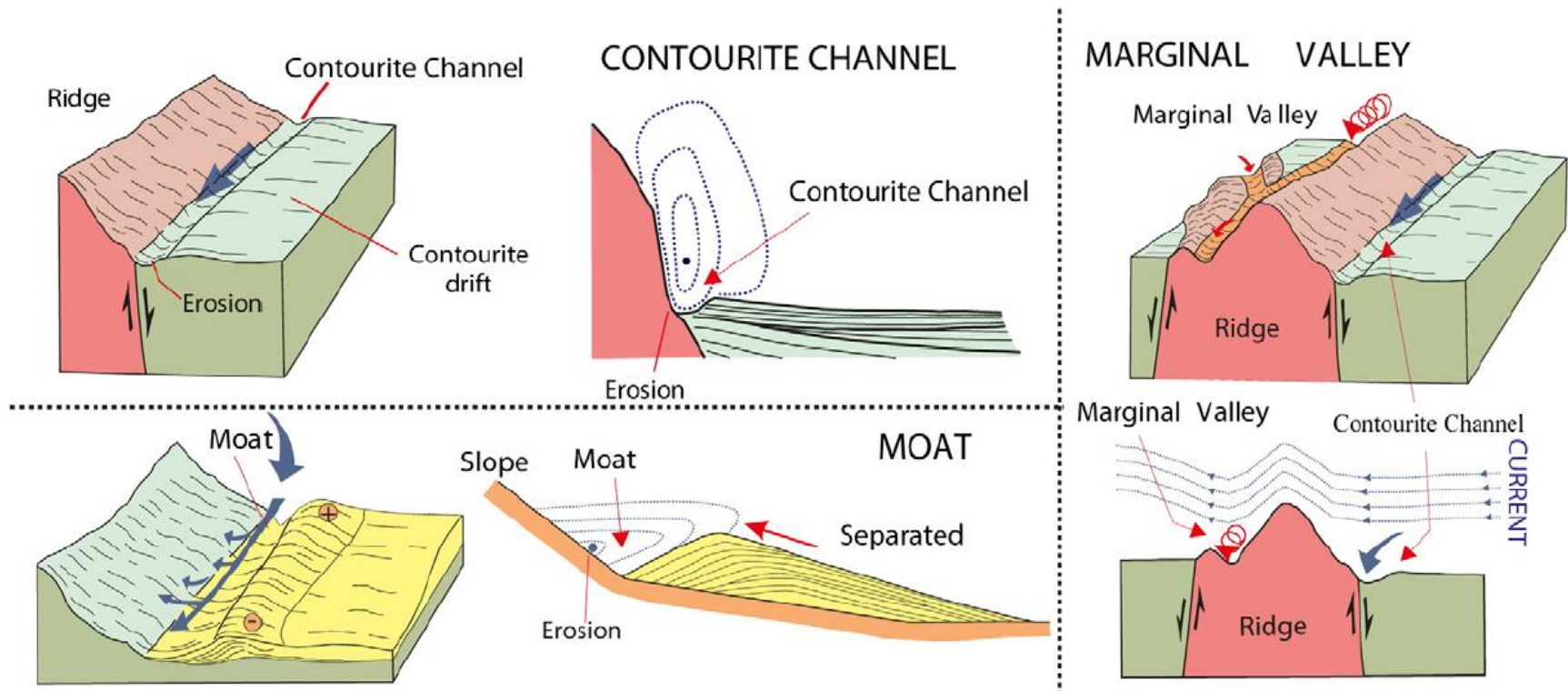


Fig. 17. Main characteristics of areal and linear, large-scale contourite erosional features. Modified from work by [Hernández-Molina et al. \(2008b\)](#) and by [García et al. \(2009\)](#), with permission from Elsevier.

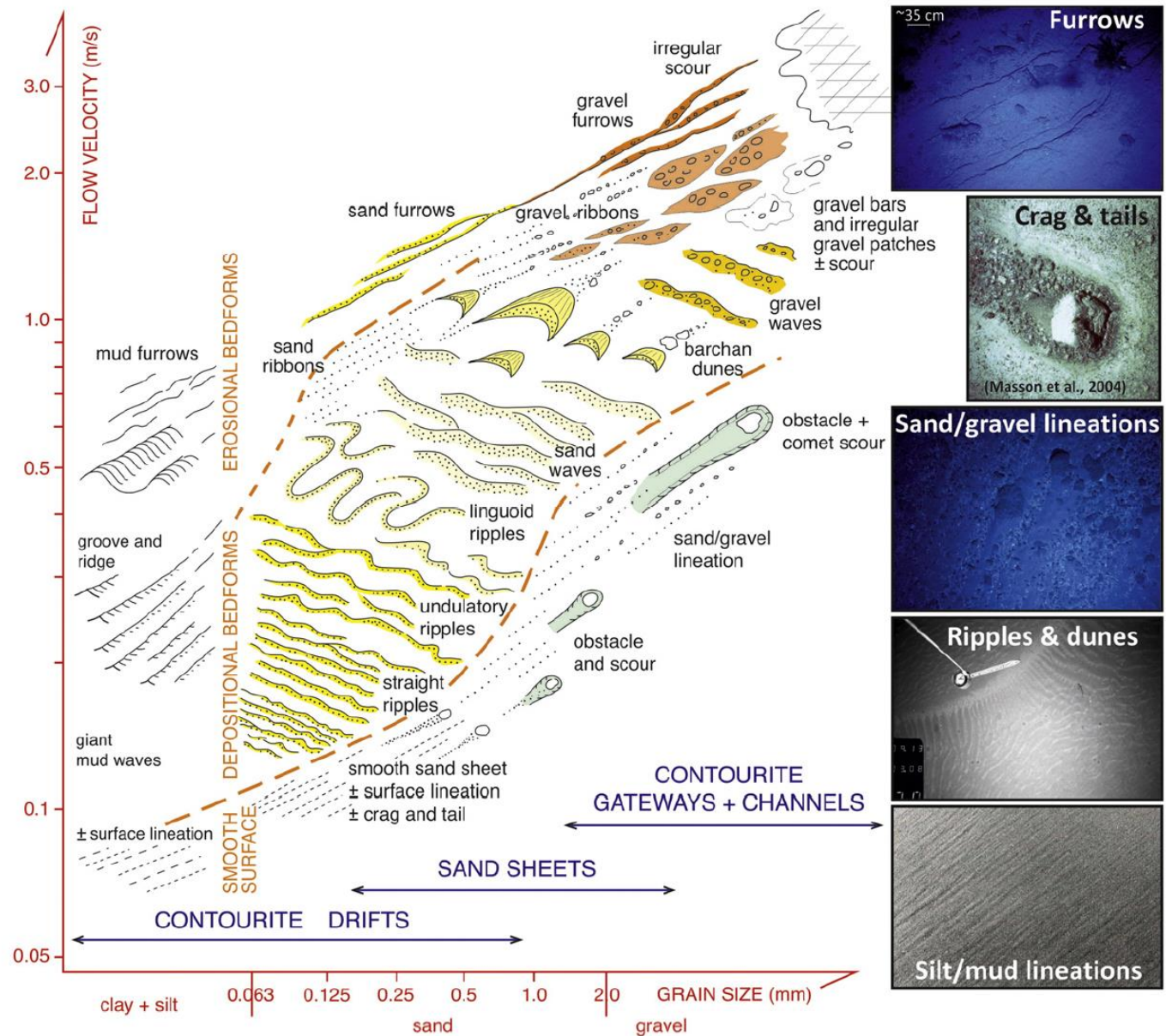


Fig. 18. Bedform-velocity matrix for deep-water bottom current systems, showing a schematic representation of bedforms in function of mean grain size of sediment versus flow velocity at or near the seafloor.

Modified from work by Stow et al. (2009), with permission from the Geological Society of America.

Главные типы осадочных структур в контуритах

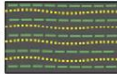
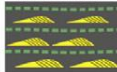
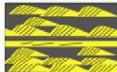
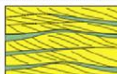
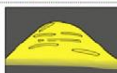
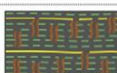
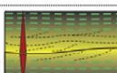
MAIN TYPES OF PRIMARY SEDIMENTARY STRUCTURES IN CONTOURITE DEPOSITS	Sketch	Sed. structures	Dominant grain size	Enviromental implications
		Horizontal or sinusoidal lamination, stripped, fine-grained deposits; "wispy" lamination	Fine sand, silt & mud < 2 Ø < 0.250 mm	Low current strength Predominance of deposition from suspension
		Lenticular bedding starved ripples	Fine sand, silt & mud < 2 Ø < 0.250 mm	Alternating flow conditions, low to moderate current strength, winnowing
		Wavy bedding, flaggy chalks	Fine sand, silt & mud < 2 Ø < 0.250 mm	Alternating flow conditions, low to moderate current strength
		Flaser bedding, mud offshoots	Fine sand to silt 8 - 2 Ø 0.004 - 0.250 mm	Alternating flow conditions, Current speed = 10 - 40 cm / s
		Climbing ripples (subcritical to supercritical)	Very fine to medium sands 4 - 1 Ø 0.063 - 0.5 mm	Current speed = 10 - 40 cm / s High suspension load
		Large-scale cross-bedding, megaripples, dunes, sandwaves	Medium sands 2 - 1 Ø 0.250 - 0.5 mm	Current speed = 40 - 200 cm / s Barchan dunes usually form at 40-80 cm / s
		Parallel lamination (upper stage plane beds), presence of primary current lamination	Very fine to medium sands 4 - 1 Ø 0.063 - 0.5 mm	Current speed = 40 - 200 cm / s
		Minor erosive surfaces, mud rip-up clasts, upper sharp contacts	Sand, silt & mud < -1 Ø < 2 mm	Alternating flow conditions, low to moderate current strength
		Sole marks: flutes, obstacle scours & longitudinal scours, cut & fill structures	Sand, silt & mud < -1 Ø < 2 mm	Flow speed peaks
		Longitudinal ripples	Coarse sandy muds (20 % sand)	Low current speed = 2 - 5 cm / s Winnowing
		Bioturbation (strongly variable)	Sand, silt & mud	Low current speed Strong paleoecological control, Low to moderate accumulation rates
		Normal & reverse grading at different scales and within different types of deposits	From coarse sand to mud Usaully fine sand, silt & mud	Gradual changes in flow strength
		Pebble lags, furrows	Coarse sand, microconglomerate	Current speed over 200 cm / s
Clay and / or mud Silt Sand Pebbles & cobbles				

Fig. 19. Main types of sedimentary structures in contourite deposits.
From Martín-Chivelet et al. (2008); with permission from Elsevier.

Структуры торможения осадка (traction features), как индикаторы перемива песка донными течениями

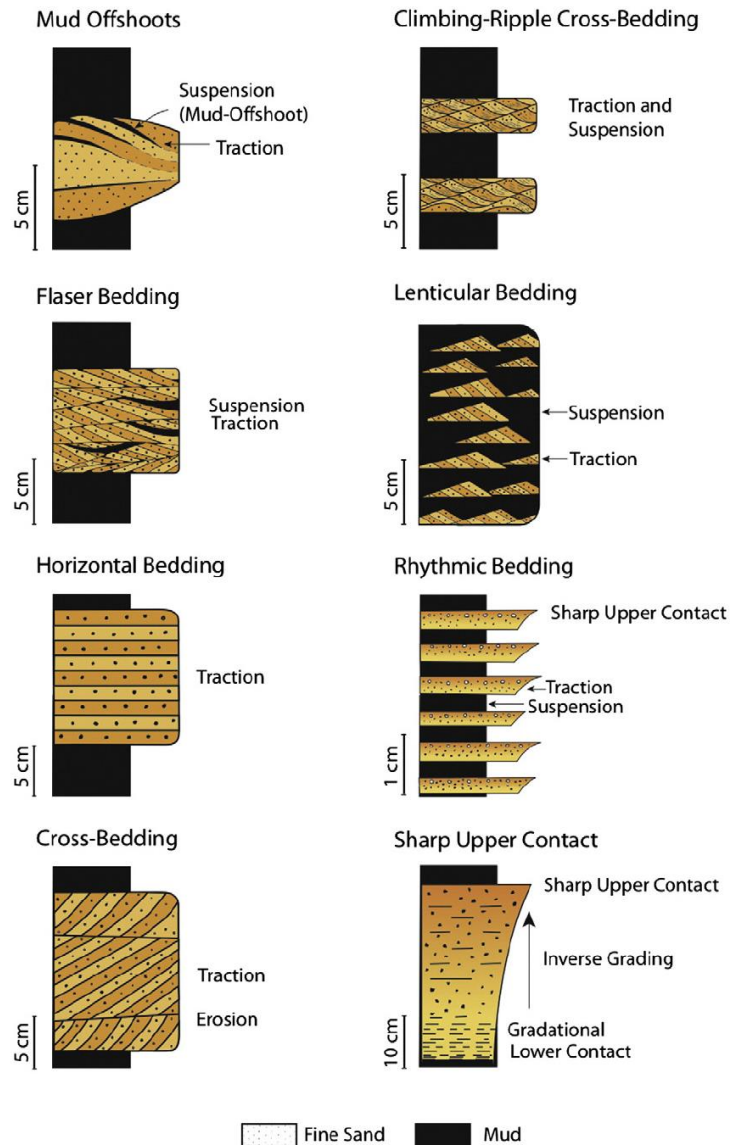


Fig. 20. Traction features interpreted as an indication of bottom-current reworked sands (BCRS). Modified from work by Shanmugam et al. (1993b) and by Shanmugam (2008), with permission from Elsevier.

Стандартная модель фаций контуритов связанная со скоростями водных потоков

M. Rebesco et al. / Marine Geology 352 (2014) 111–154

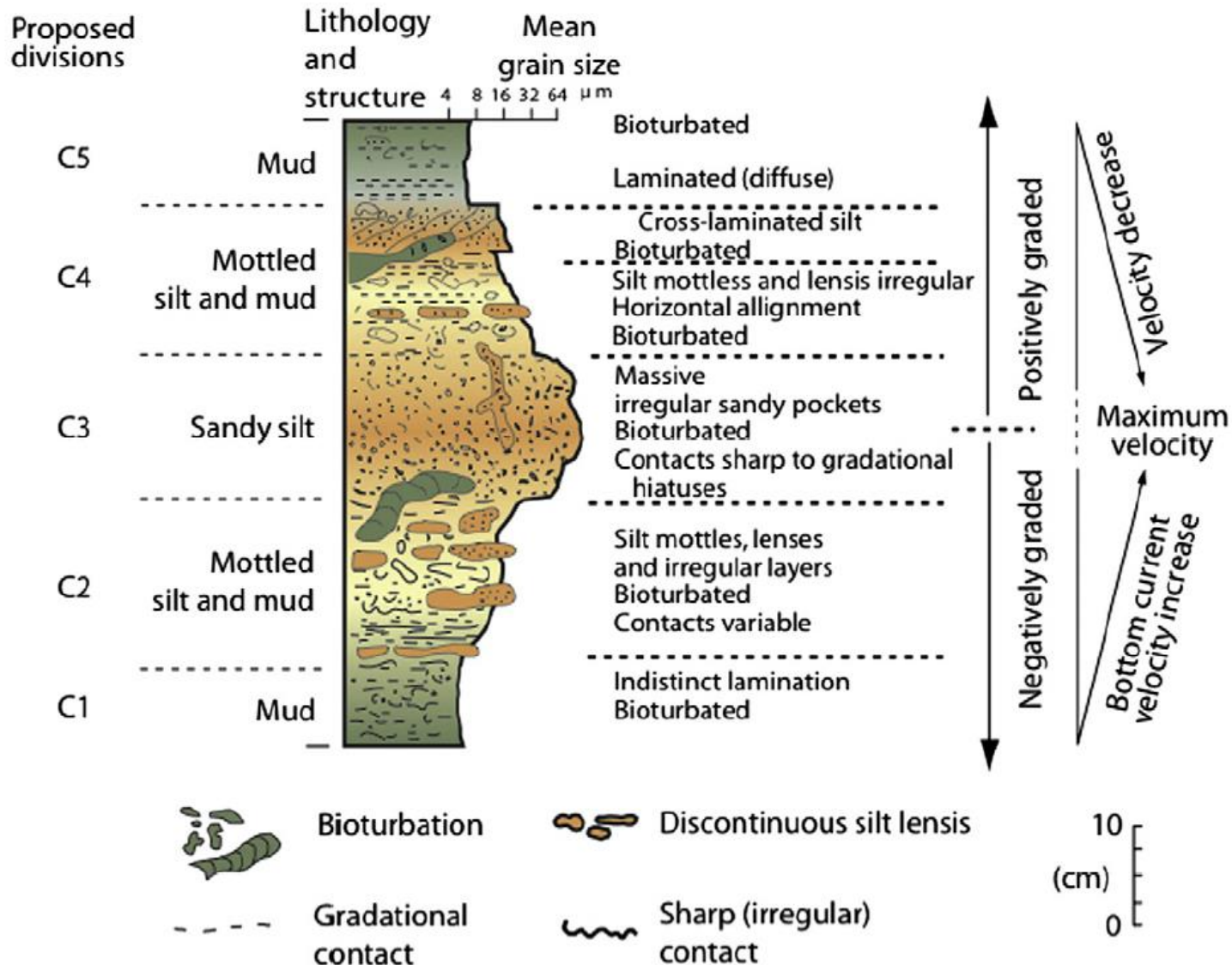


Fig. 24. Standard facies model of contourite sequence, linked to variation in contour-current velocity.
From Stow and Faugères (2008), based on the original figure from Gonthier et al. (1984); with permission from Elsevier.

Модифицированная стандартная модель фаций контуритов

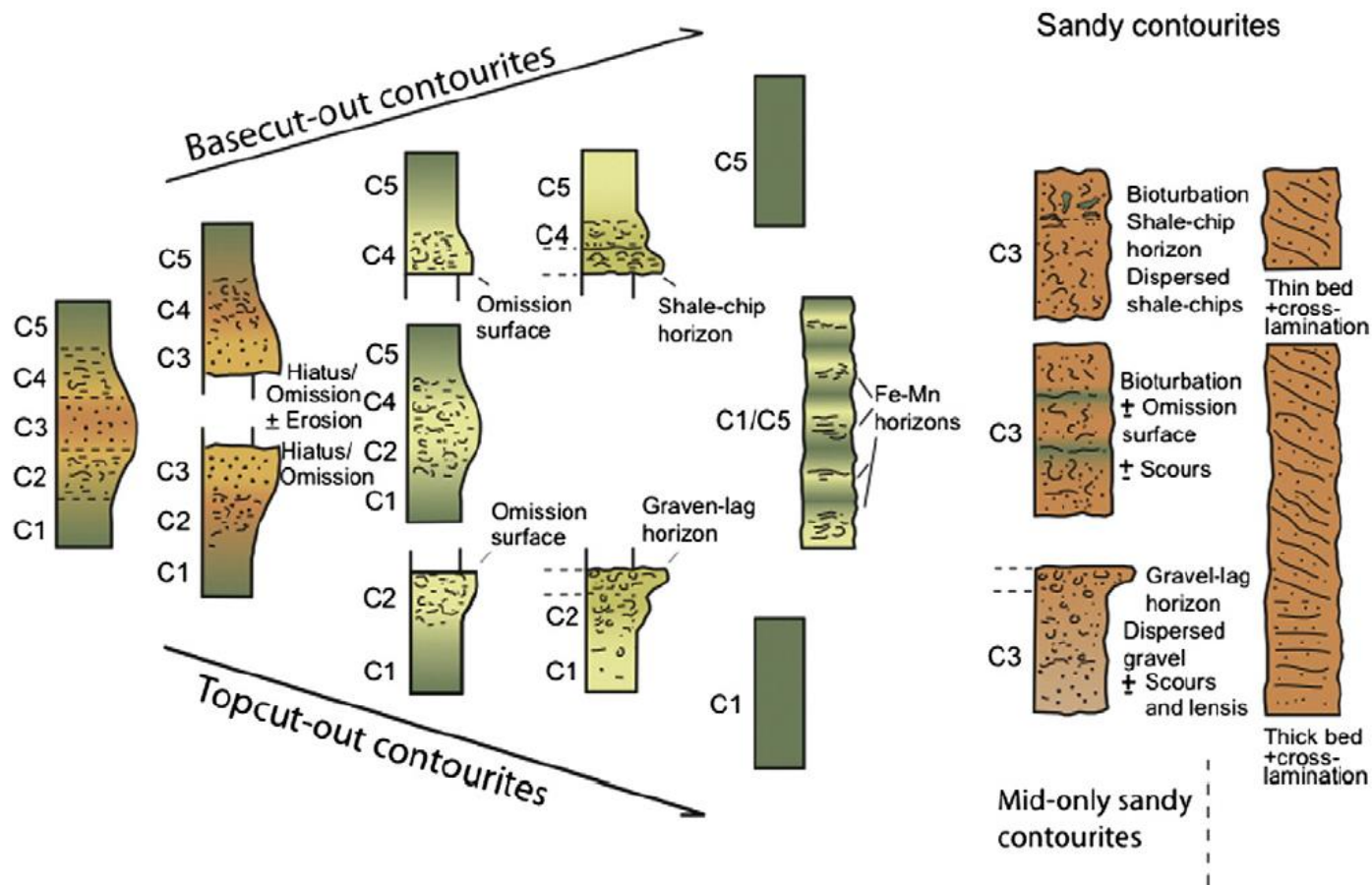


Fig. 25. Modifications and variations on the standard contourite facies models, showing the range of contourite facies, sequences, and partial sequences commonly encountered in contourite successions.

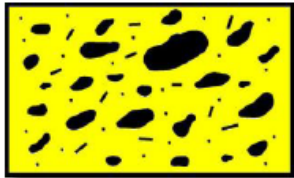
From Stow and Faugères (2008); with permission from Elsevier.

Type of deposits		Grain size	Characteristics	Sed. Structures	Examples
CLASTIC CONTOURITES	Muddy contourites	5 - 11 ϕ < 0.31 mm	50 % Clays < 15 % of sands ≤20 -30 % of bioclastic and / or carbonate components Homogeneous & highly bioturbated Poor sorting	Rare laminations Bioturbation Indistinct mottled appearance	Rockall Trough (Stow & Faugères, 2008)
	Silty contourites	4 - 8 ϕ 0.063-0.004 mm	40 - 60 % Silts Interbedded between muddy & sandy contourites Poor sorting Sharp to irregular tops and bases	Tractive structures (ripples, sed.waves) Bioturbational mottling Ichonofacies	Gulf of Cadiz (Stow & Faugères, 2008)
	Sandy contourites	-1 - 4 ϕ 2 - 0.063 mm	Sheeted to wedge bedding Well-sorted deposits, but can be poor to moderate Mixed siliciclastic / biogenic composition Heavy mineral concentration Both positive & negative grading Gradational or erosive contacts	Tractive structures (e.g.: horizontal lamination, cross-lamination, ripples, etc) Bioturbation (sub.vertical burrows) Massive layers (structureless) Erosional or gradational contacts	Gulf of Cadiz (Stow & Faugères, 2008)
	<i>Bottom current reworked sands (BCRS)</i>	Normally does not exceed fine sands	From previous turbiditic deposits Rhythmic layers Lenticular bedding Well sorted Coarsening upward sequences Sharp to gradational bottom contact and sharp (nonerosional) upper contact	Tractive structures (e.g.: horizontal lamination, low-angle cross lamination; mud-offshoots in ripples, mud-drapes, flaser, etc)	Gulf of Mexico (Shanmugam, 2006, 2012)
	Gravel contourites	< -1 ϕ > 2 mm	Winnowing & erosion (channels, moats, etc) Irregular layer and lenses Poorly to very poorly sorted	Sandy gravel lag	Eschsch-Schelfand Channel (Alkharaf et al., 2002)
VOLCANOCLASTIC CONTOURITES		Mud, silt or sands	Similar to the siliciclastic facies Composition is dominated by volcanoclastic material	Similar to the clastic contourites	Hawaii (Puga-Bernabeu, A. Pers. Comm.)
SHALE-CLASTS OR SHALE-CHIP LAYERS		Shale clasts generally mm in size	Developed in muddy & sandy contourite facies From substrate erosion by strong bottom currents Burrowing on the nondeposition surface	Clast axes sub-parallel both to bedding and to the current direction	Water depth = 400 m Brazilian Basin (Faugères et al., 2008)
CALCAREOUS CONTOURITES	Calcareous muddy & silty contourites	> 4 ϕ < 0.063 mm Silty clay to clayey silts	>70 % of bioclastic and / or carbonate components Dominant biogenic input Poorly sorted Distinct sand-size fractions (biogenic particles) Composition: pelagic to hemipelagic, including nannofossils & foraminifers as dominant elements Admixture of siliciclastic or volcanoclastic material	Bedding is indistinct, but may be enhanced by cyclic variations in composition / grain size. Bioturbation	Orizaba Spur (Biogen GENESIS Cruise)
	Calcareous sandy contourites	-1 - 4 ϕ 2 - 0.063 mm Sands	Equivalent of sandy contourites Both well-sorted to poorly sorted Particles from pelagic, benthic, off-shelf & off-reef sources Admixture of siliciclastic, volcanic & siliceous material	Thin-bedded cross-laminated foraminera contourite. Lenticularity Hardgrounds on depositional surfaces Bioturbation & burrowing	Water depth = 3 km Gulf of Cadiz (F. Sierra, Pers. Comm.)
	Calcareous gravel lag contourites	< -1 ϕ > 2 mm Gravel	Clasts or chips derived from erosion of the substrate		
SILICEOUS BIOCLASTIC CONTOURITES		Mud, silt or sands	Rich in diatomaceous & radiolarian material	Laminated and / or cross-laminated sands	Blake-Bahama Basin (DSOP Site 534, Sheridan et al 1983)
CHEMOGENIC CONTOURITES	Manganiferous contourites		Manganiferous or ferro-manganiferous horizons Areas with ferro-manganese nodules & pavements	Bioturbation & burrowing	Basin d'Alon (Gonthier et al., 2003)
	Chemogenic gravel-lag contourites		Deep-water chemoherms (chemical - biogenic precipitates) of metal - carbonate chimneys, mounds & encrustations Winnowed and aligned into chemogenic gravel-lags	Strewn od debris Alineation of gravel-lag	Belmshausen Basin (Neech & Hollister, 1971)

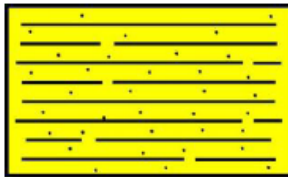
Fig. 22. Classification of contourite deposits. Types of deposits, grain size, general characteristics, common sedimentary structures, and a representative example of each type are included. Bottom current reworked sands (BCRS), as defined by Shanmugam (2006, 2012a), within sandy contourites are also considered here. Adapted from Stow and Faugères (2008).

PRELIMINARY CONTOURITE FACIES TRACT INFERRED FROM CORE OBSERVATIONS

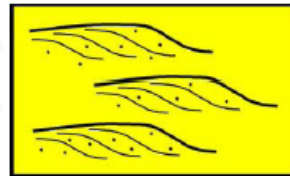
SLIGHTLY MODIFIED FROM MUTTI & CARMINATTI, 2012



(CFA) MUDDY FINE SAND WITH ABUNDANT MUDSTONE CLASTS



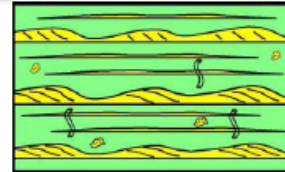
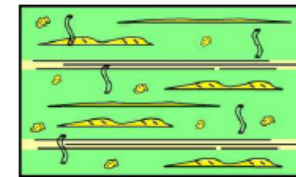
(CFB) M-THICK WELL SORTED HORIZONTALLY LAMINATED FINE AND VERY FINE SAND


Flow direction


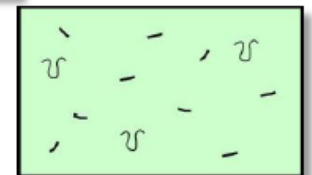
(CFC) M-THICK WELL SORTED FINE AND VERY FINE SAND WITH RIPPLES DISPLAYING INTERNAL SIGMOIDAL LAMINAE


Flow direction

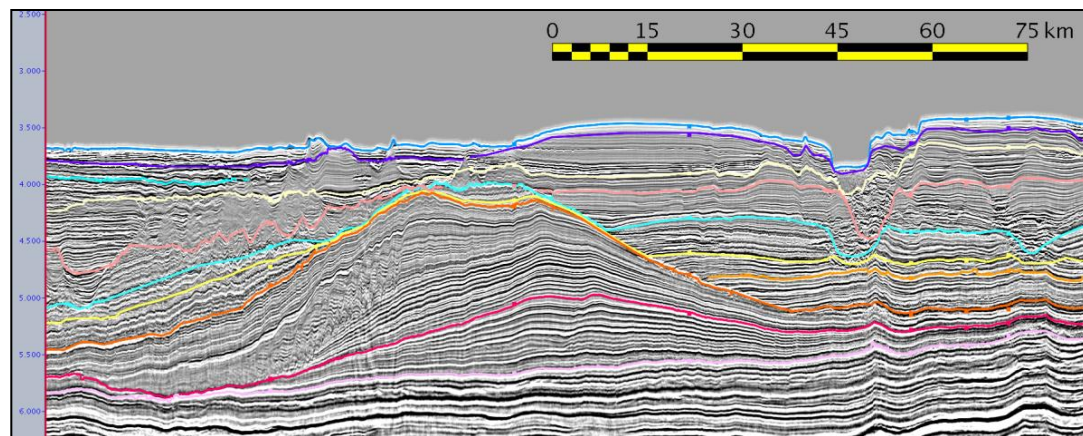
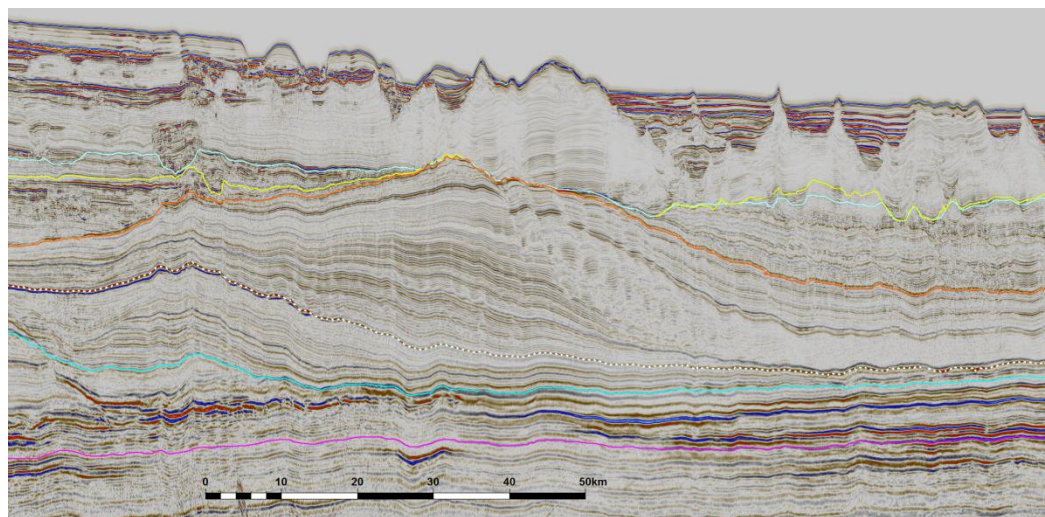
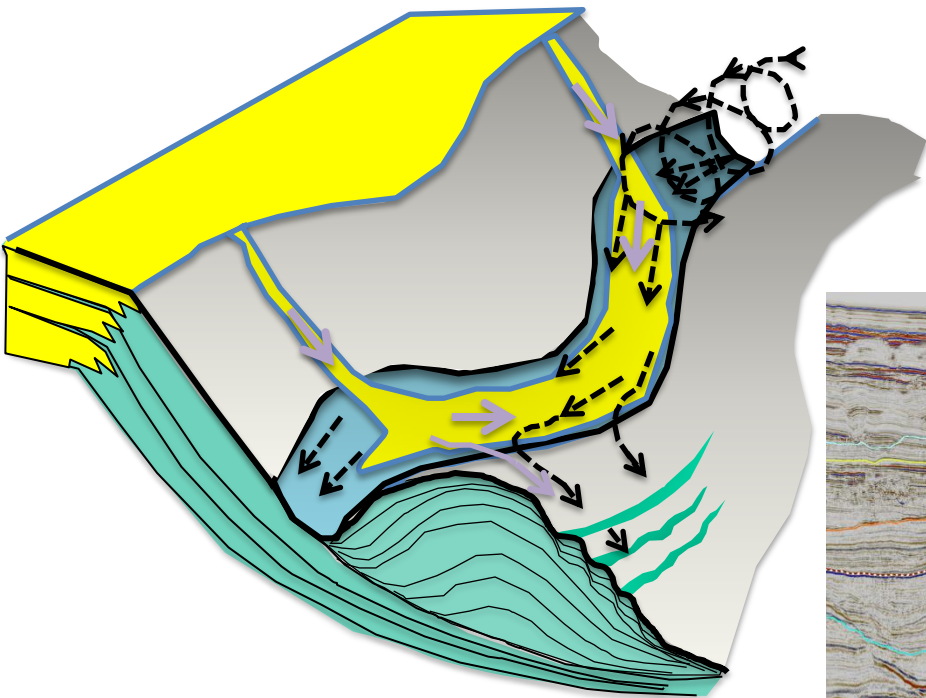
(CFD) ALTERNATING CM-THICK PACKAGES OF RIPPLE-LAMINATED FINE-GRAINED SAND AND BIOTURBATED MUDDIER UNITS WITH SAND STREAKS

(CFE) CM-THICK PACKAGES OF LENTICULAR RIPPLED SAND AND SAND STREAKS ALTERNATING WITH MUDSTONES. BIOTURBATION IS VERY COMMON. THESE THIN UNITS STRONGLY RESEMBLE CONTOURITE FACIES CYCLES OF THE CLASSIC STOW'S MODEL (STOW *ET AL.*, 2002)

(CFF) HIGHLY BIOTURBATED TERRIGENOUS, MIXED AND BIOGENIC (CALCAREOUS) MUDSTONES

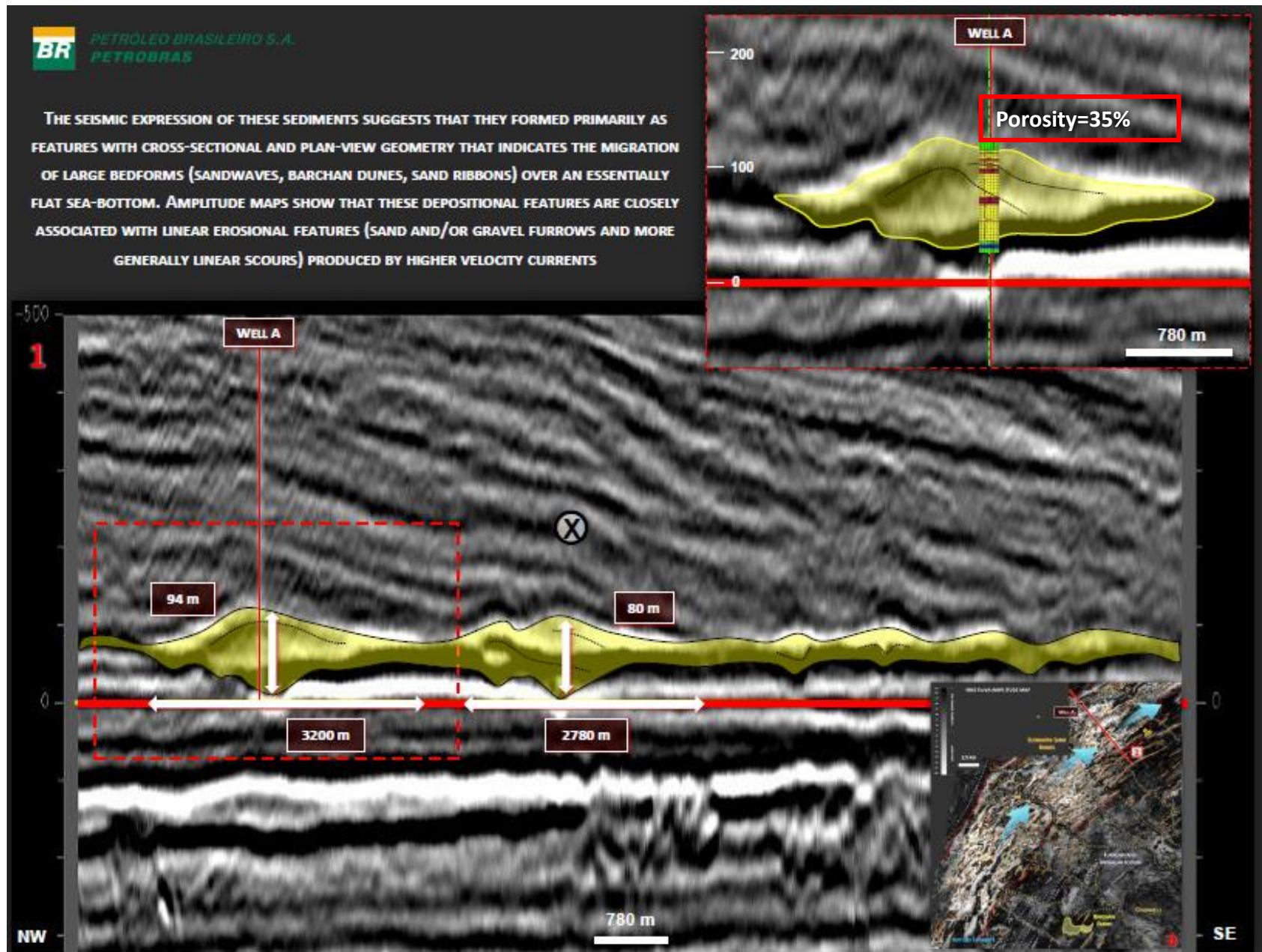


Модель формирования контуритов и их изображение на сейсмических профилях

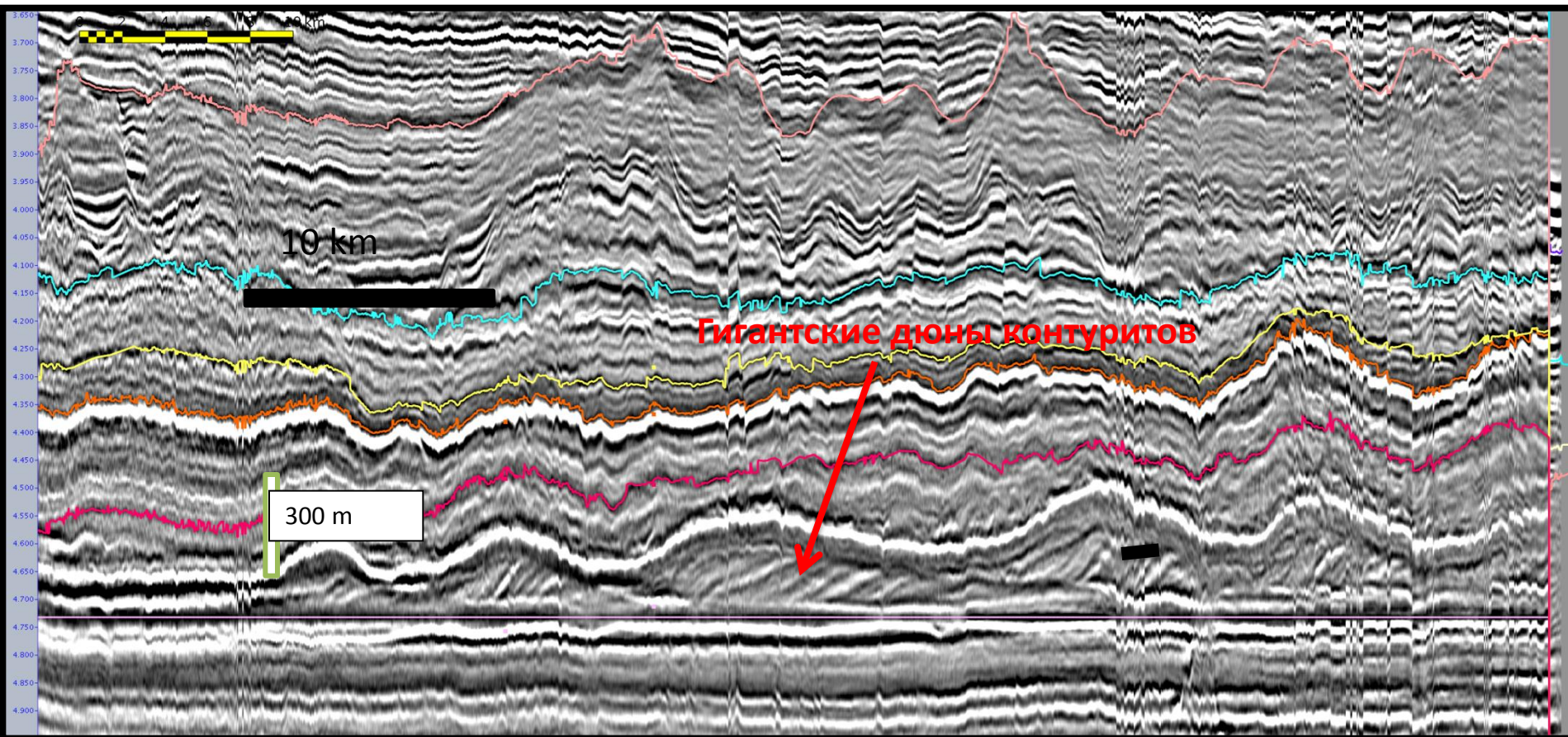


О. Змановская, Д. Калмыков,
О. Курносова и др.

Why is important to study contourites → Campos analog



Контуриты могут образовывать гигантские дюны с крутыми клиноформами



Профиль с выравниванием

Типичное соотношение канально-турбидитовых систем и контуритов

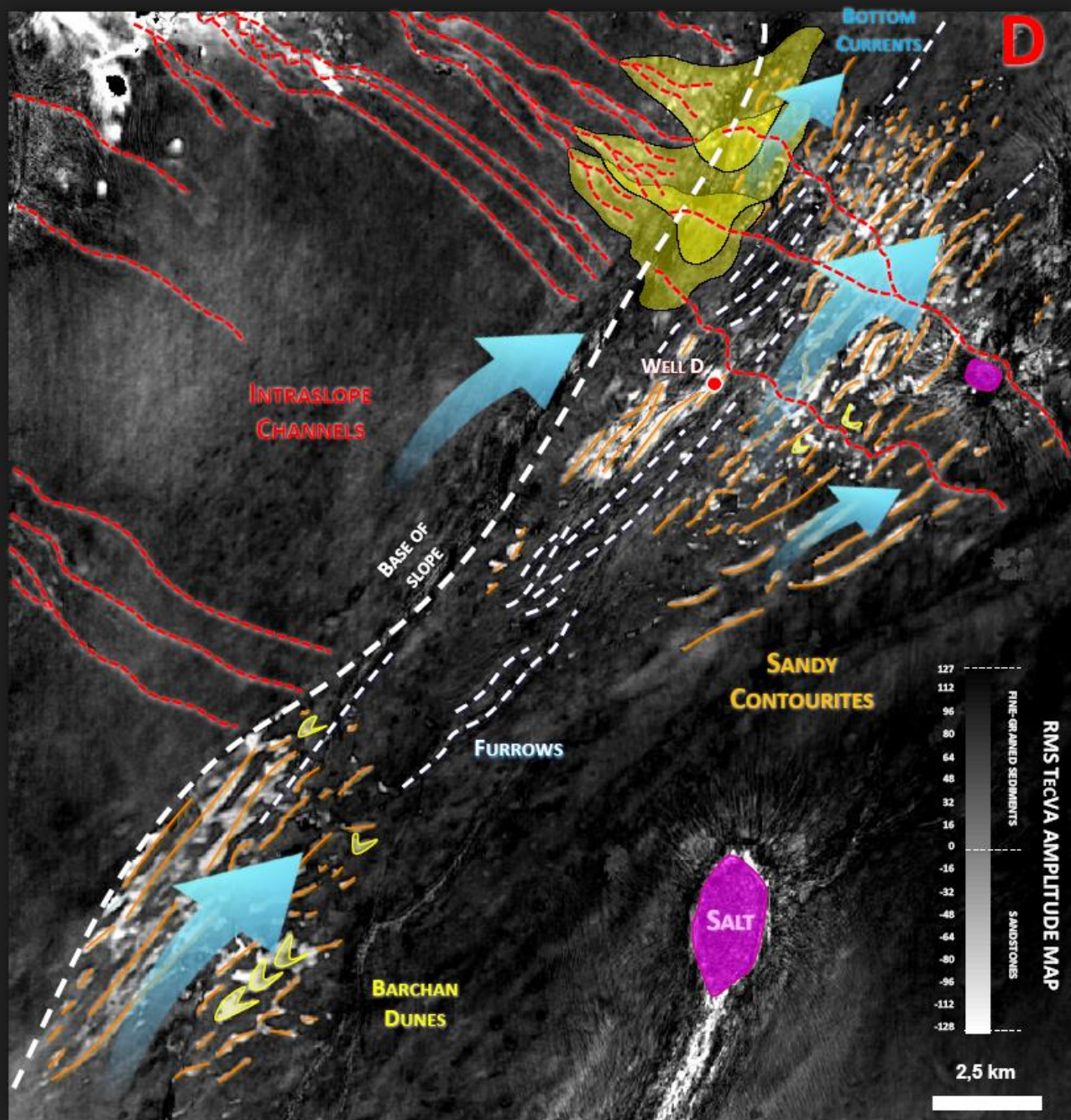
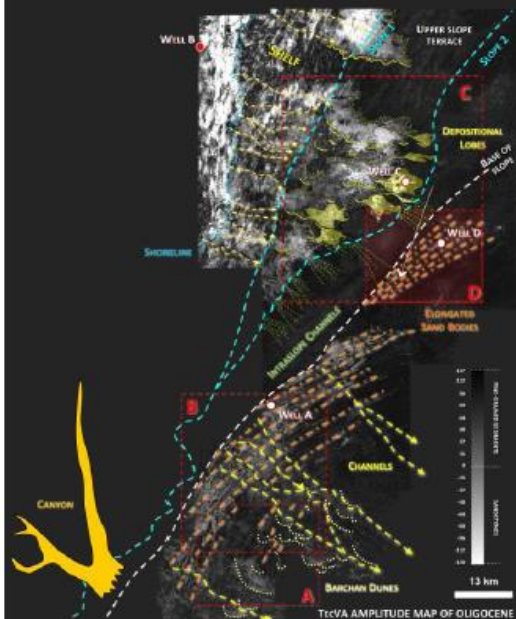


PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.
PETROBRAS

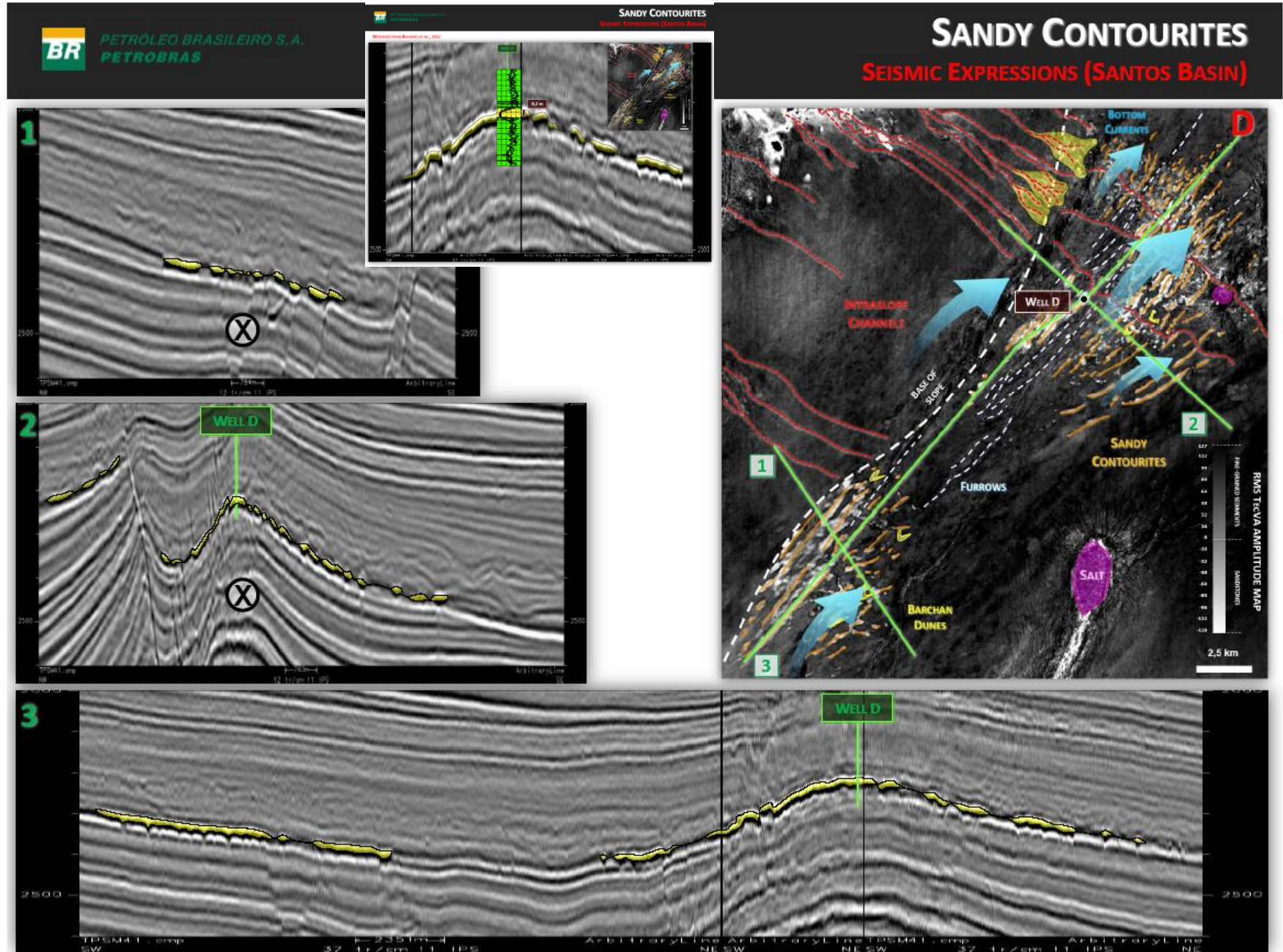
SANDY CONTOURITES TYPES OF GEOMETRY

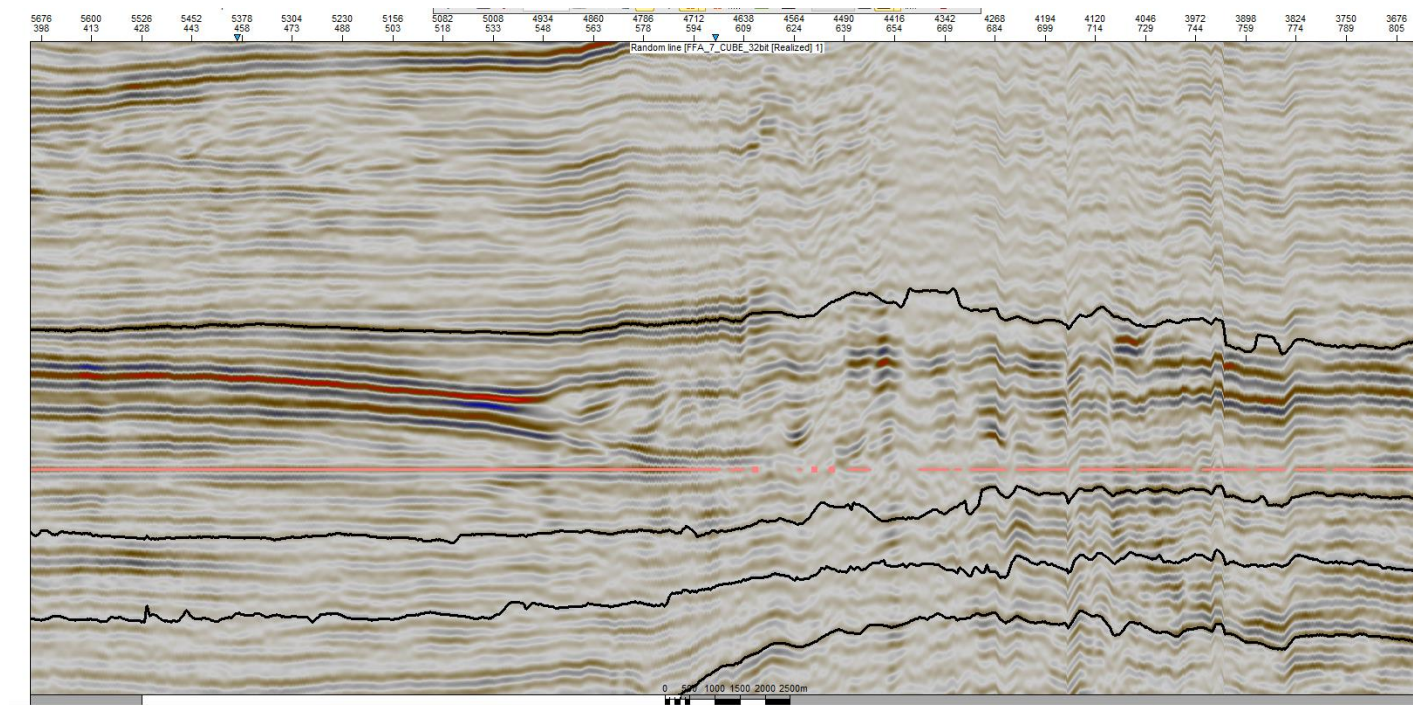
- LARGE SAND-DUNE FIELDS
- SAND WAVES
- BARCHAN DUNES
- SAND FURROWS
- SAND RIBBONS

MODIFIED FROM BULHOES ET AL., 2012



Пробуренное песчаное тело в контуритах (показано желтым цветом)





Осадочные волны

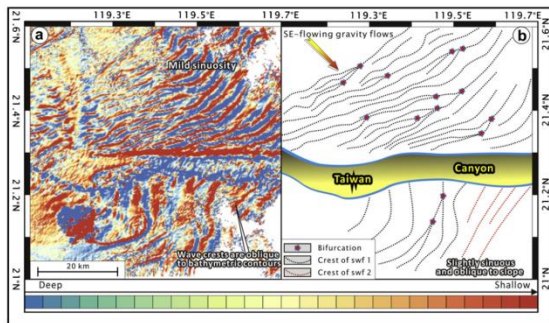


Figure 3. (a) Multi-beam bathymetry map (plan view) showing two sediment wave fields. (b) Sketch of the wave crests shown in (a). Crests of the sediment waves in fields 1 and 2 are marked in black and red dotted lines respectively. Notice that crest lines of the sediment waves in field 1 are slightly sinuous and show regular bifurcation, and align perpendicular to the down-slope SE flowing gravity flows and canyon axis. In contrast, crests of the sediment waves in field 2 are straighter, and are parallel or subparallel to the bathymetric contours. See Figure 2 for the location of the bathymetric survey. swf = sediment waves in field.

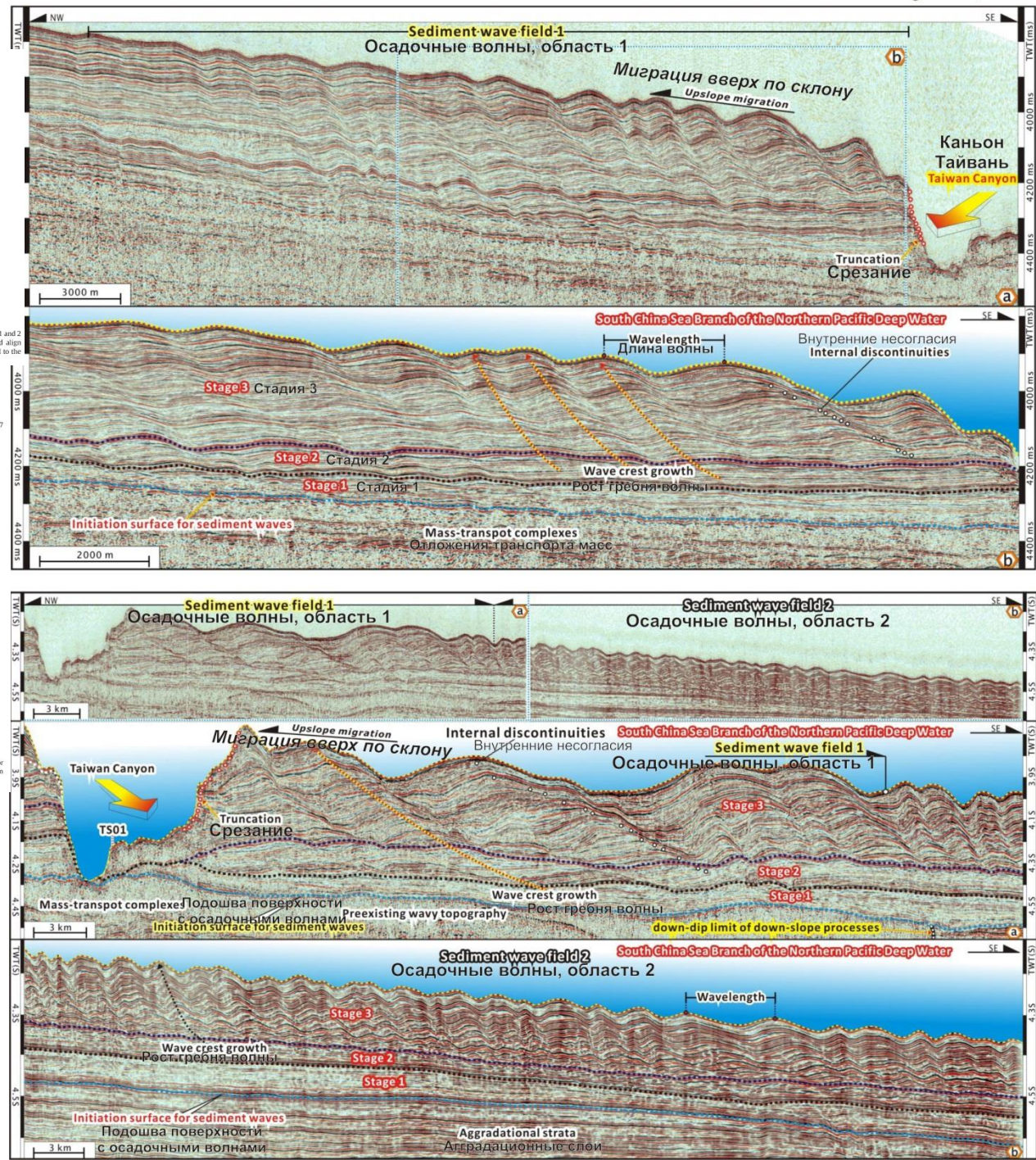


Figure 2. Detailed bathymetric image of the study area showing the locations of the studied sediment wave fields, fields 1 and 2, the piston cores TS01 and TS02, and other major geological elements in the area. The dashed lines show the locations of the high-resolution seismic profiles in Figures 4 and 5. The dotted boxes illustrate the multi-beam bathymetry surveys shown in Figures 3 and 9 (a) respectively. Bathymetric contours are in meters. See Figures 6–8 for detailed analyses of these two cores.

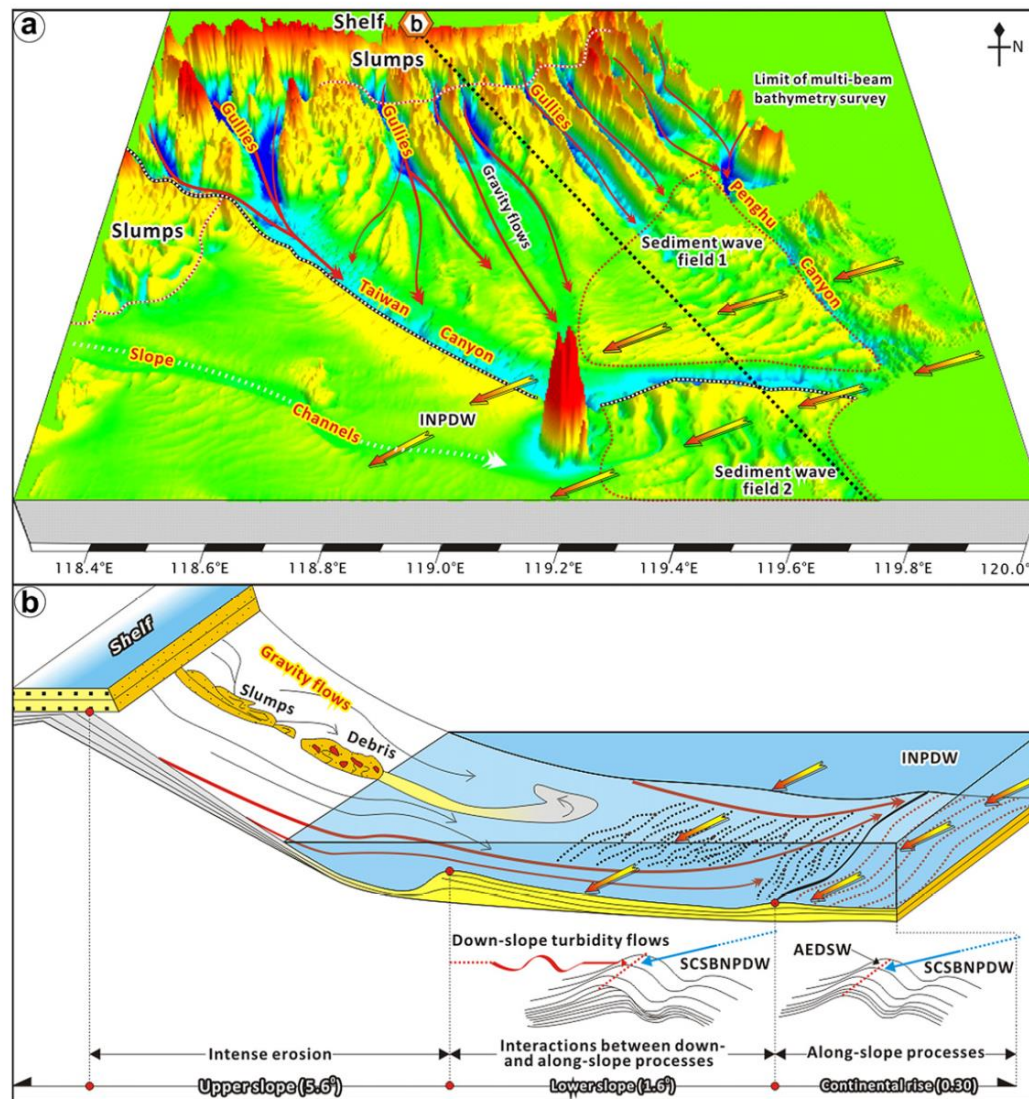


Figure 9. (a) Three-dimensional bathymetric image showing the morphology and major depositional elements in the study area. Notice the wide occurrence of channels, canyons and gullies in the upper slope, suggesting significant erosion by gravity flows. Two sediment wave fields are shown up clearly in plan view. (b) Schematic diagram summarizing the major depositional processes in different region of the study area. The upper slope is characterized by gravity flow erosion and sediment bypass. Sediments shed from the upper slope are transported basinward into the lower slope where the interactions of down-slope turbidity currents and along-slope bottom (contour) currents induced by the intrusion of the Northern Pacific Deep Water into the study area (INPDW) result in the development of sediment wave field 1. Further basinward into the continental rise where sediment wave field 2 is develop, turbidity currents are diluted and along-slope bottom currents are the dominant processes. The directions of the bottom (contour) currents resulted from INPDW is inferred from the elongation directions and the cross-section geometries of the sediment waves as well as the lee-wave model (Flood, 1988). INPDW = the intrusion of the Northern Pacific Deep Water into the study area, AEDSW = average elongation direction of sediment waves. See Figure 2 for location of the 3D survey.

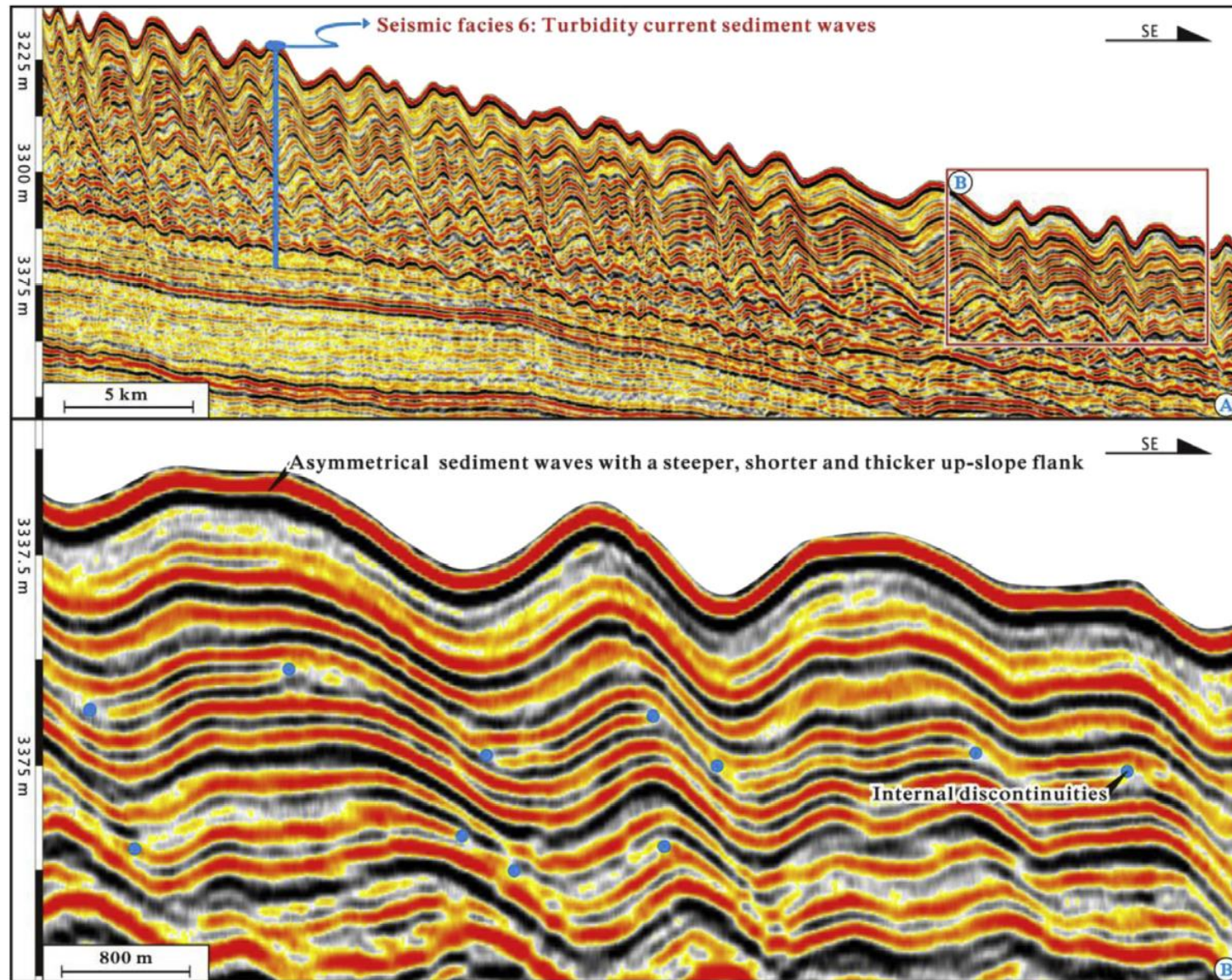


Figure 6. Sediment waves in sediment wave field 1 (seismic facies 6) appeared on dip-oriented seismic section. (B) Enlarged seismic image illustrating a blown-up view of discontinuous wavy seismic facies. Please refer to Figure 1 for the plan-view distribution of sediment wave field 1 in the study area and to Figure 2 for line location.

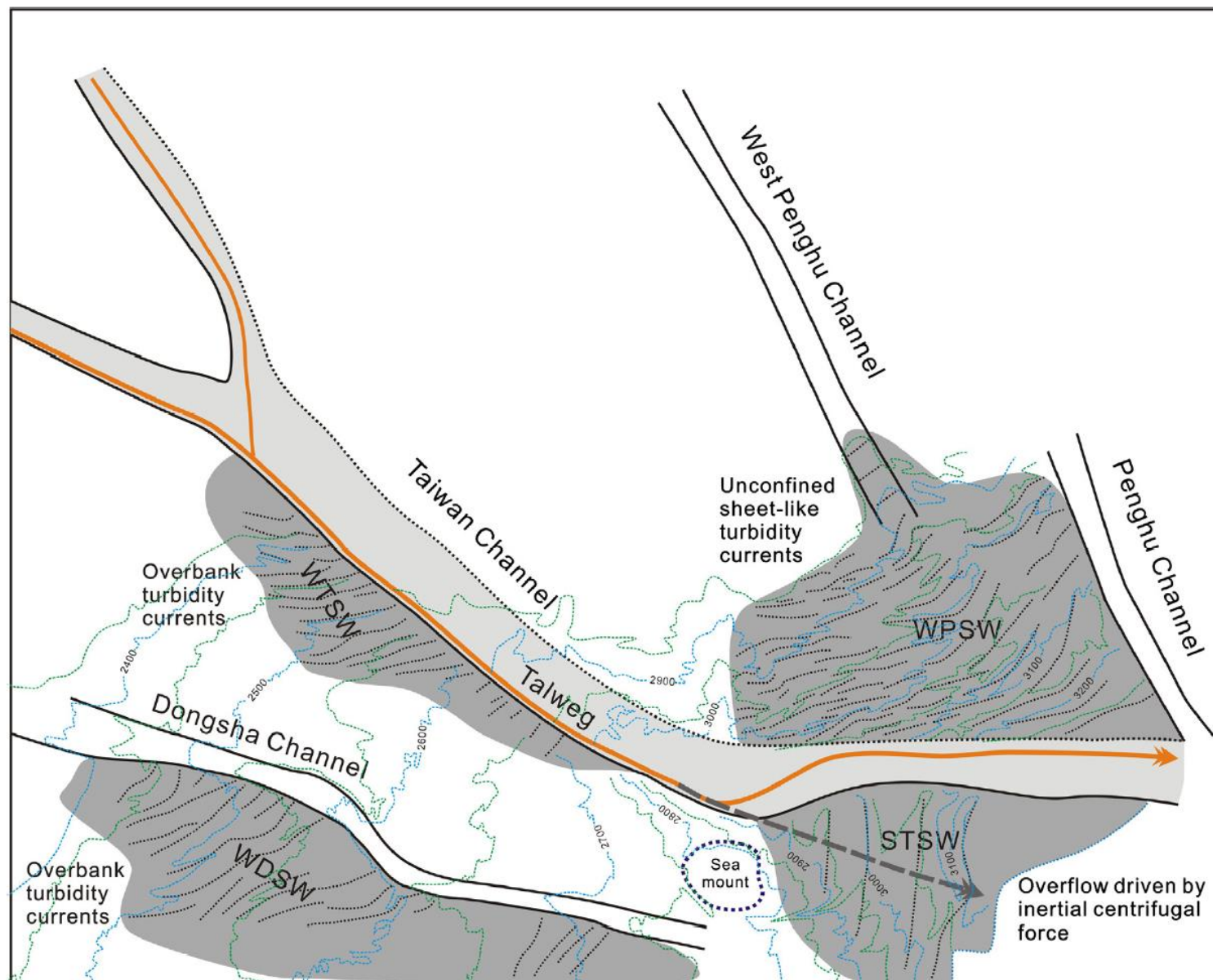


Fig. 12. Sketch map showing occurrences of the sediment wave fields and related channels. The black dashed lines represent the sediment wave crests. The green and blue dashed lines are selected water depth contours. It is noted that the crests of the sediment waves are roughly parallel to local bathymetric contours. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

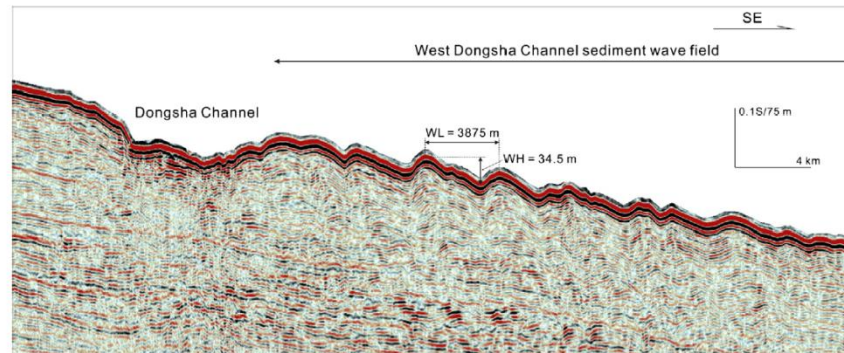


Fig. 6. Seismic characteristics of sediment waves in the WDSW. See Fig. 2 for profile location. WL = wavelength; WH = wave height.

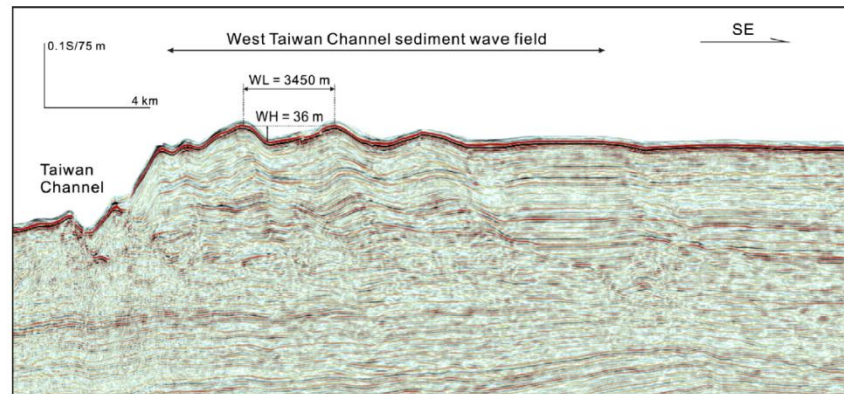


Fig. 7. Seismic characteristics of sediment waves in the WTSW. See Fig. 2 for profile location. WL = wavelength; WH = wave height.

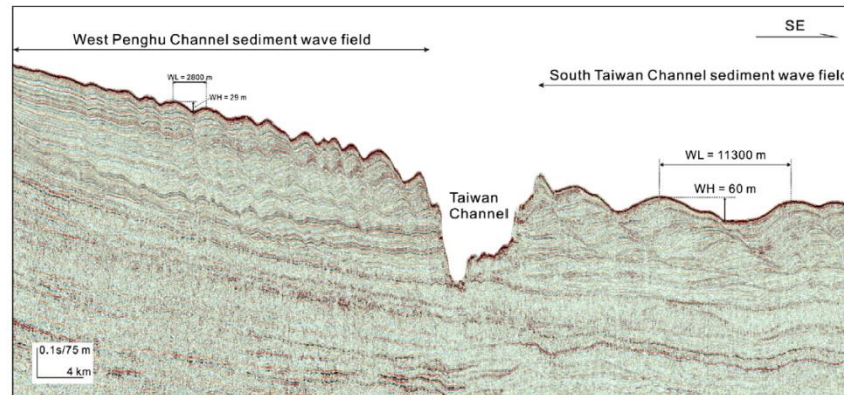


Fig. 8. Seismic characteristics of sediment waves in the WPSW and STSW. Note the dimension contrast of the two sediment wave fields. See Fig. 2 for profile location. WL = wavelength; WH = wave height.

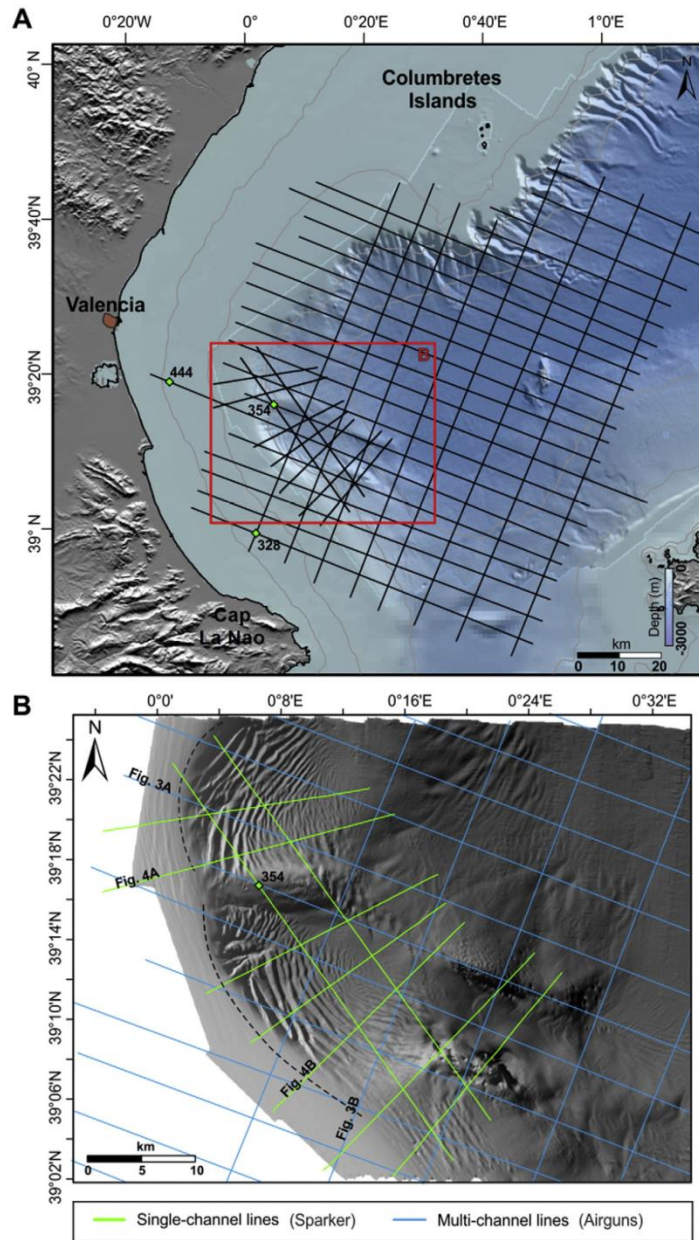


Fig. 2. A) Location of the seismic profiles acquired in the Gulf of Valencia within the study area (red square). The green dots indicate the position of the industry boreholes. B) Detail of the Gulf of Valencia continental slope, in which the northern and central sediment wave fields are observed, indicating the location of the single and multi-channel lines used in this study. The dashed line indicates the extent of the two main sediment wave fields (northern and central).

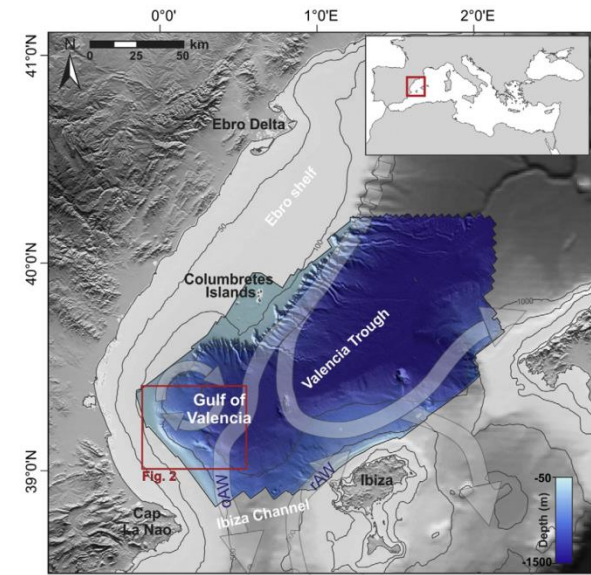


Fig. 1. Bathymetric map of the Catalano-Balearic Sea, composition of the GEBCO digital database (IOC et al., 2003) and the detailed swath bathymetry mosaic for the Valencia Trough. Arrows indicate the regional surface circulation (rAW: recent Atlantic Waters; oAW: old Atlantic Waters). Square indicates the location of the study area.

278

M. Ribó et al. / Marine Geology 378 (2016) 276–291

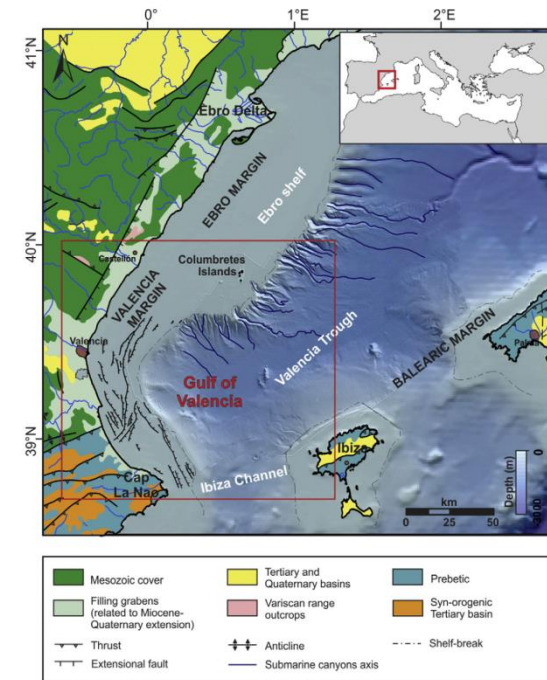


Fig. 1. Location, geological and tectonic map of the eastern Iberian Peninsula and the Valencia and Balearic Margins. The red square indicates the location of the Gulf of Valencia area.

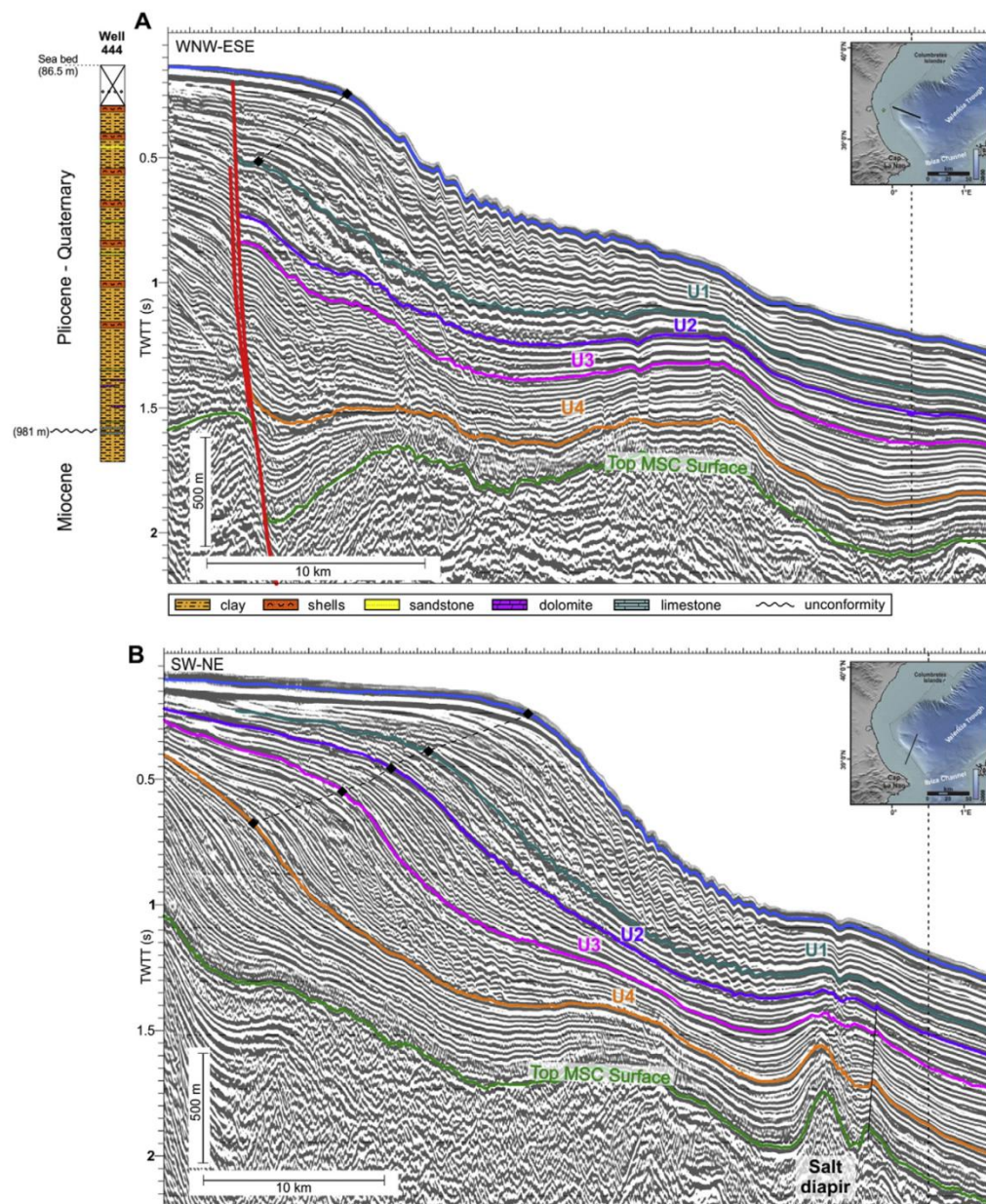


Fig. 3. Multi-channel seismic lines crossing the A) northern and B) central sediment waves fields (Fig. 2), extending from the outer shelf to the Gulf of Valencia continental rise. Red line indicates the position of the Valencia Fault, which offsets the basement and the Top Messinian surface (green line). The color lines mark the horizons that serve as limits of the several sediment waves units (U1, U2, U3, and U4). The connected black squares indicate the roll-over points of the prograding continental margin. The stratigraphic column shown in A was extracted from well 444 Golfo de Valencia F-1 (see Fig. 2 for location). Black thin line marks the position of a fault associated with a salt diapir (B). Black dashed lines indicate the position where the two seismic lines cross.

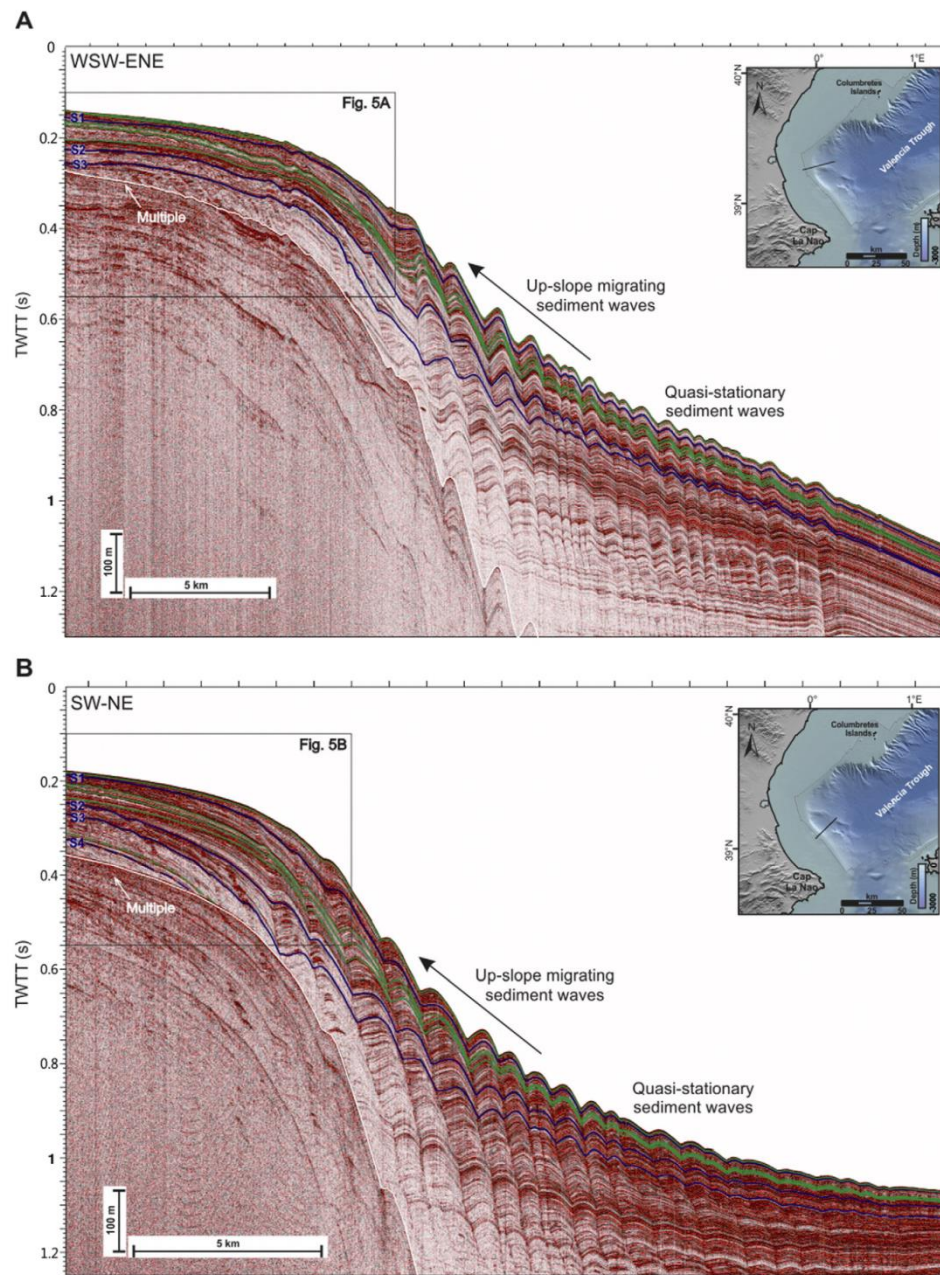


Fig. 4. Single-channel seismic lines across A) the northern and B) the central sediment waves fields (Fig. 2), illustrating the two sets of sediment waves, over the outer continental shelf and over the continental slope. The dark blue lines indicate the erosional surfaces (S1 to S3), and dark green lines delimit are horizons bounding different depositional units. The white line marks multiple location.

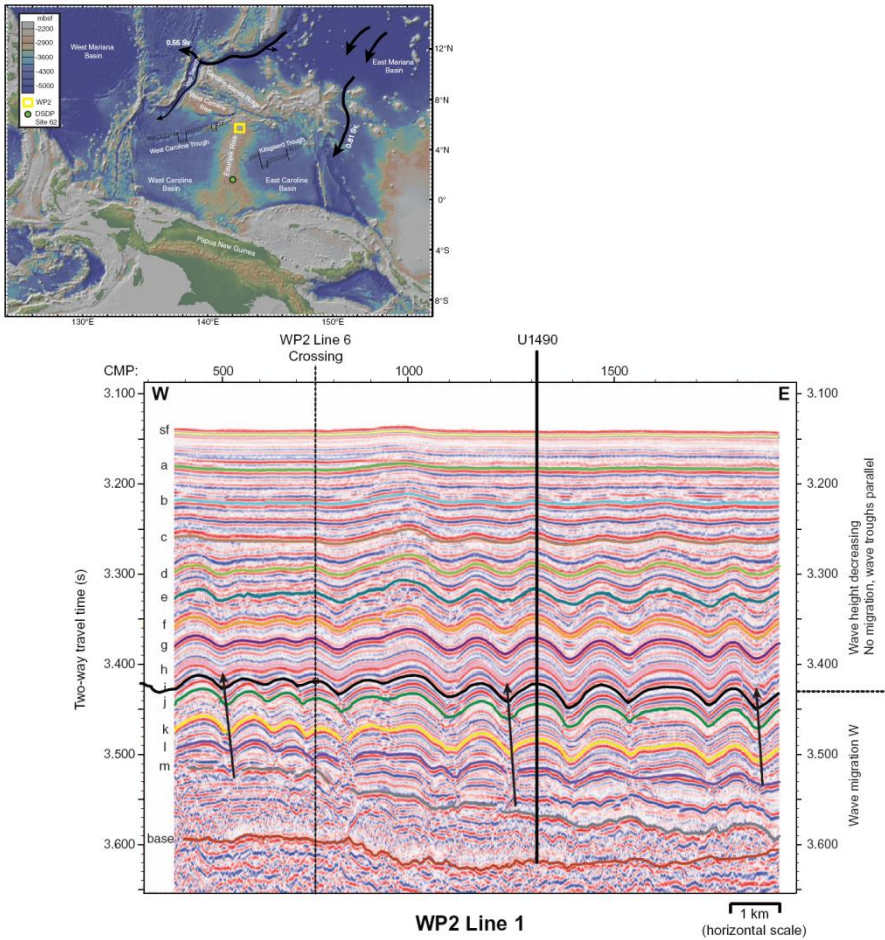


Fig. 6. Part of seismic profile 1 passing through Site U1490 and intersecting seismic profile 6 (location in Fig. 2). The seafloor and 13 buried reflectors are highlighted with distinct colors, and each has been loop correlated throughout the seismic grid. Names of reflectors referred to in the text are labeled at the left edge of the profile. Arrows show examples of wave migration below horizon h.

K.E. Baldwin et al.

Marine Geology xxx (xxxx) xxx–xxx

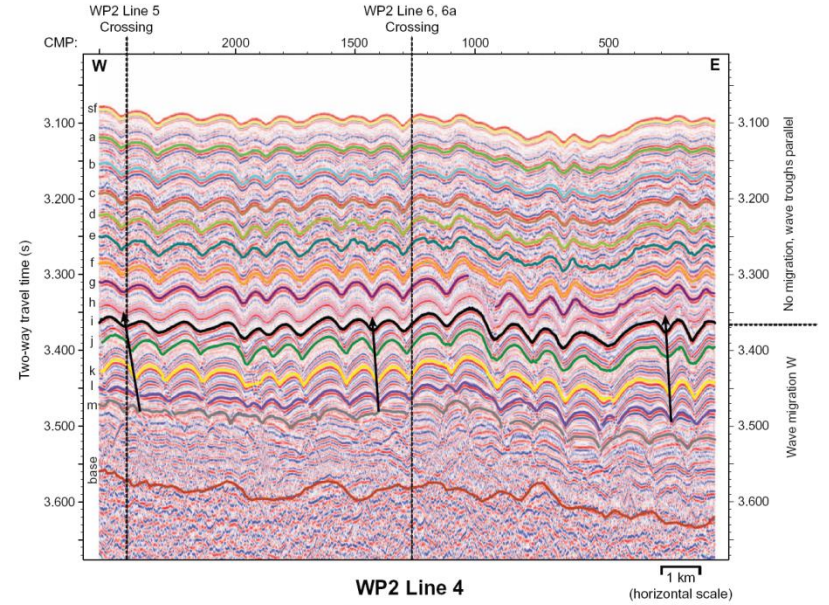


Fig. 7. Seismic profile 4 showing intersections with lines 5 and 6 (location in Fig. 2). Irregular basement is overlain by 100 + m of poorly organized reflectors. Sediment waves begin at horizon m and until horizon h migrate towards the NW (black arrows). Sediments above that level remain well organized, especially in the western half of this profile, but any wave-like horizons do not migrate. Seafloor and 13 buried reflectors are highlighted with distinct colors, and each has been loop correlated throughout the seismic grid. Names of reflectors referred to in the text are labeled at the left edge of the profile. Arrows show examples of wave migration below horizon h.

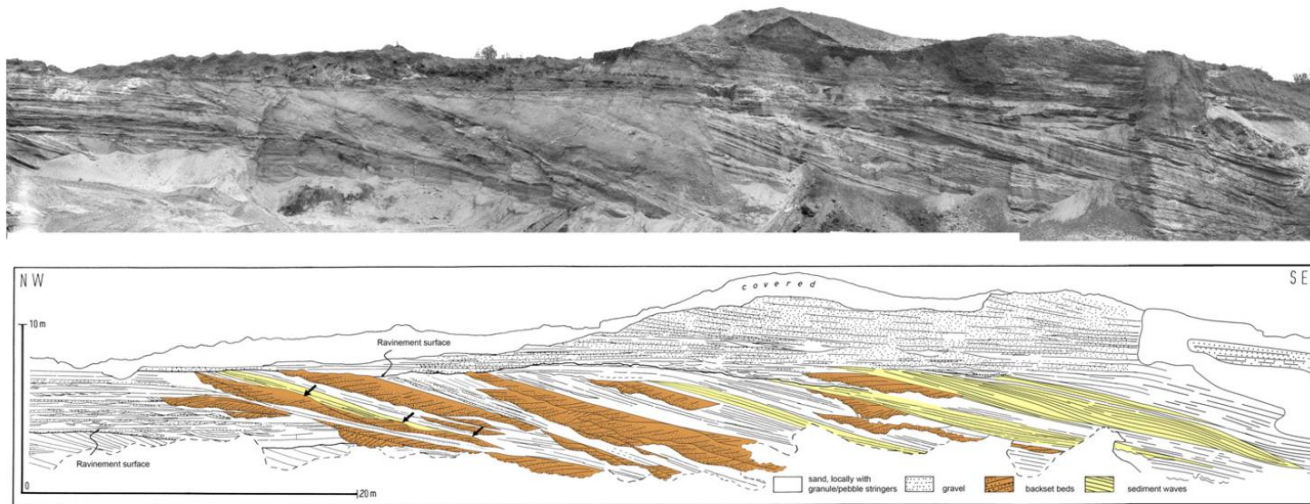


Fig. 5. Photomosaic and drawing of San Biagio quarry. Front is sub-parallel to the direction of progradation of high-gradient siliciclastic clinoform wedge, showing the association of backset-bedded sets (orange), sediment waves (yellow), and foreset beds (white). Backset-bedded sets show top surfaces mostly erosional, locally gently convex-up, and are in places vertically stacked. In streamwise direction they are either isolated or irregularly spaced, except in the case indicated with arrows (left), where a series of three sets with gently convex-up top follow one another, suggesting lateral stacking of three bedforms. Note on the left some backset-bedded sets “climbing” up to the top of the foreset slope and shortly extending on the topset, beyond the rollover, where they appear to be interbedded with shoreface deposits. Ravinement surfaces cut during episodes of base level rise are overlain by shoreface deposits. Bradanic area, ~6 km SSE of the village of Montescaglioso.

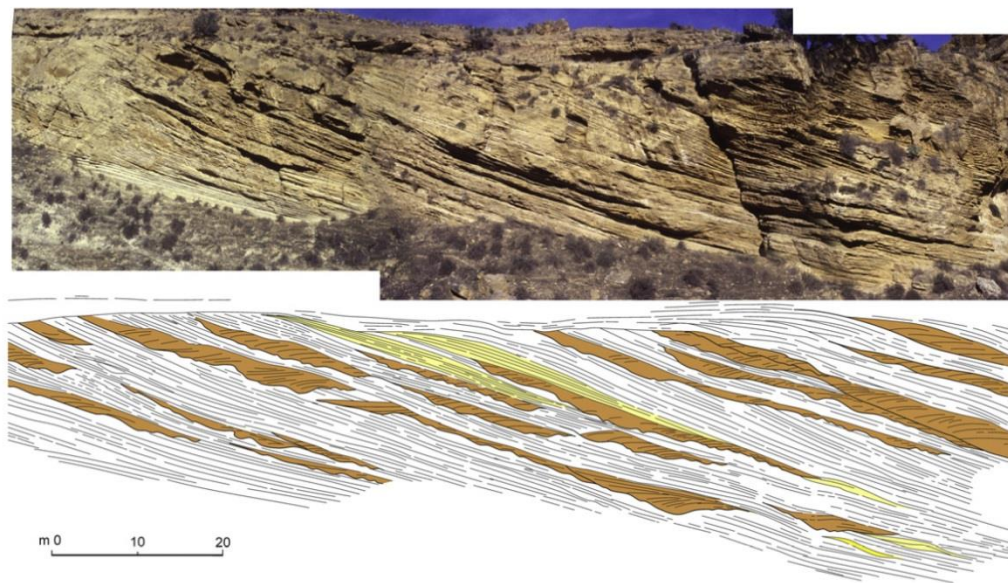


Fig. 6. Photomosaic and drawing of a bioclastic, high-gradient clinoform wedge, in a section sub-parallel to the direction of progradation. Backset-bedded units (orange), are associated with sediment waves (yellow) and foreset beds. Backset-bedded units are locally truncated at the top of the clinoform complex by a toplap surface. Capodarso body (~6 km E of the town of Caltanissetta, Sicily).

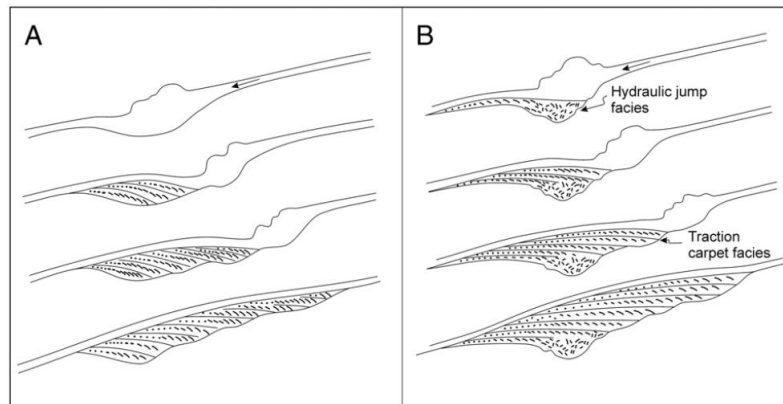


Fig. 16. Schema (not to scale) of successive steps of development of a backset-bedded set, without (A), and with (B) associated scour-filling facies with disorderly fabric (hydraulic jump facies) at the base of the set.

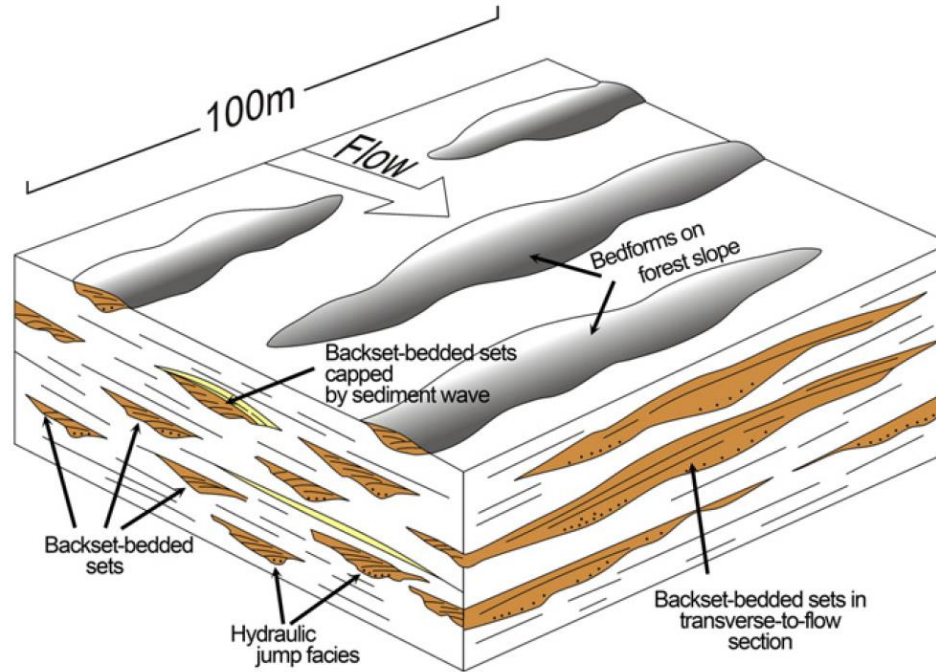


Fig. 17. Diagram based on sections of backset-bedded units parallel and transverse to palaeoflow, showing a tentative reconstruction of the three-dimensional geometry of presumably unconfined bedforms occurring on the foreset slope of the investigated clinoform systems influenced by shallow-marine hydrodynamics.

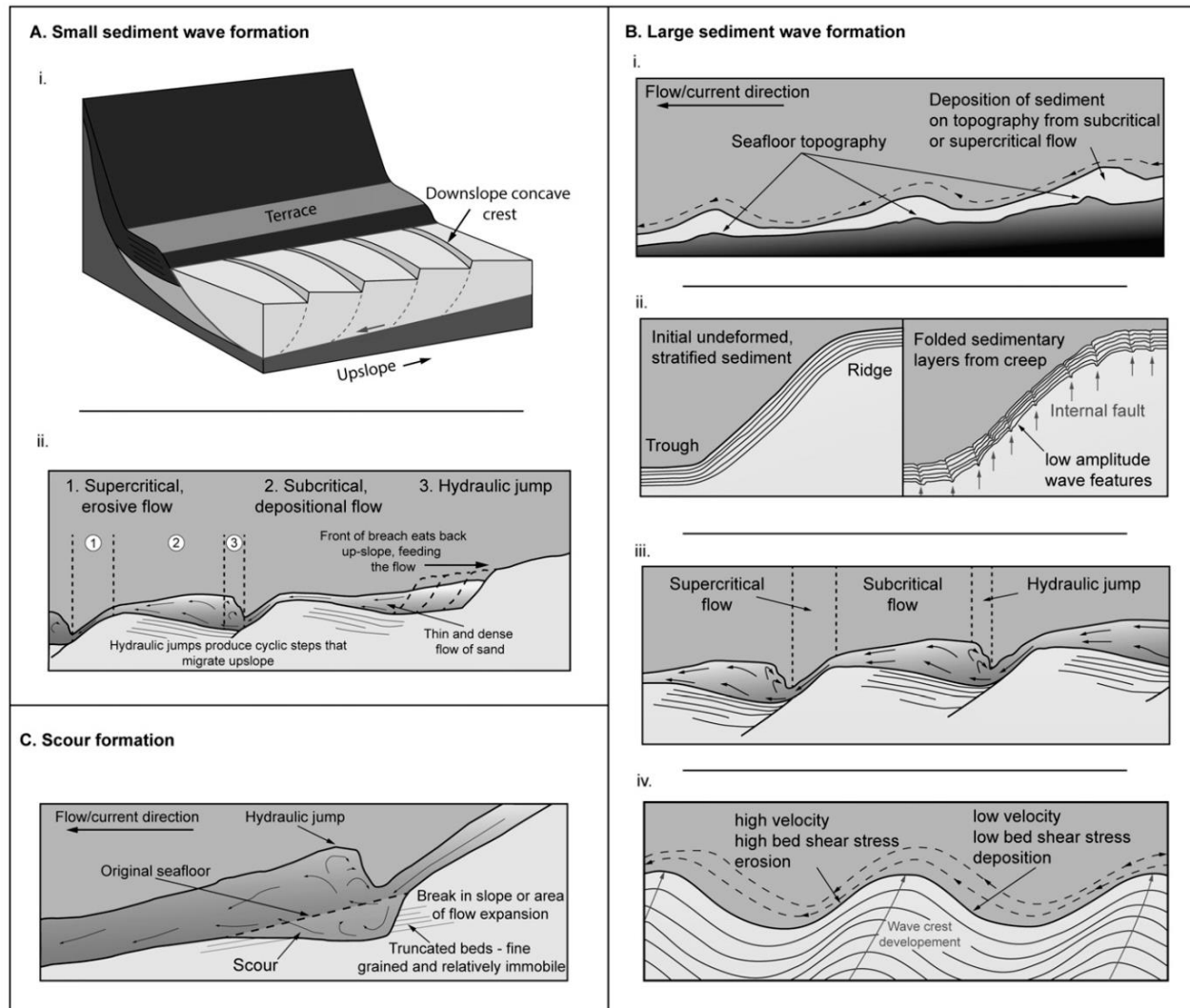


Fig. 13. Cartoons of possible mechanisms for bedform formation. (a) Small sediment wave formation. (i) Slumping of channel fill along listric faults could generate asymmetrical bedform shapes with crescentic crests (modified from Fig. 12 of Paull et al., 2010). (ii) Asymmetric, small sediment waves can be formed by the up-current migration of cyclic steps. The origin of the thin and dense flow of sediment is from failure on a master scarp (modified from Fig. 2 of Cartigny et al., 2011 and Fig. 3 of Van den Berg et al., 2002). (b) Proposed ideas for the formation of sediment waves. (i) Kubo and Nakajima (2002) suggest that the formation and migration of small sediment wave fields is a result of topographic effects and possible from subcritical flow, not purely supercritical flow. (ii) Broad crested and narrow troughed wavy stratified sediment can be formed from sediment creep and deformation, with internal faults common in troughs. Sediment creep is initiated on gentle slopes ($<0.5^\circ$) from external triggers such as earthquakes (modified from Lee and Chough, 2001). (iii) Sediment waves are cyclic steps, generated from a thick and tranquil flow (subcritical) on the upslope limb and a swift, shallow flow (supercritical) eroding the downslope limb, bounded by a hydraulic jump (modified from Fig. 2 of Cartigny et al., 2011). (iv) The lee wave model (modified from Flood, 1988). Sedimentation from a weakly stratified flow over undulating topography would lead to preferential deposition on the upstream flank. (c) Scour formation. Scours could be generated by erosion due to a hydraulic jump that forms because of flow expansion or a break in slope.

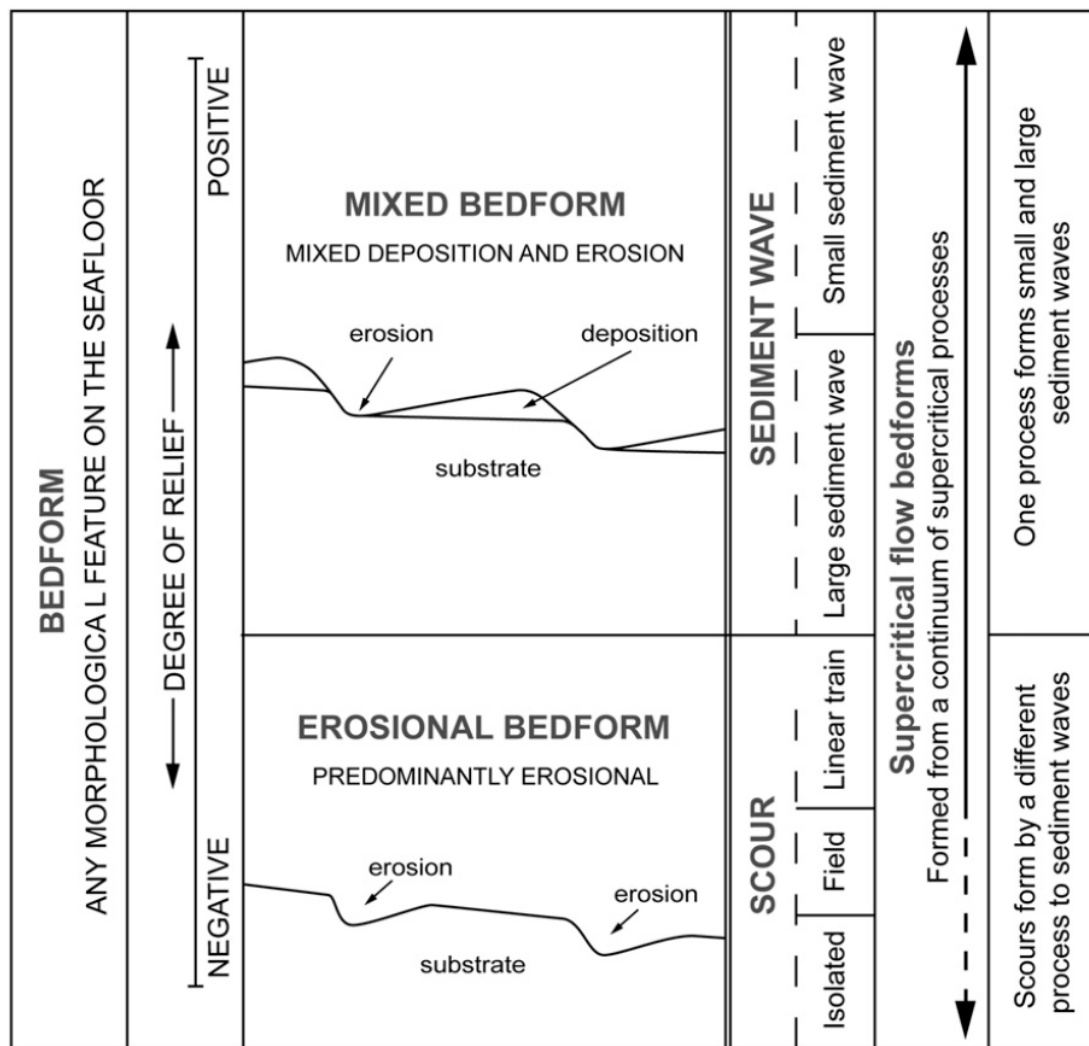


Fig. 16. Classification of seafloor bedforms with the new terminology introduced in this study. A continuum of supercritical bedforms is shown along with an alternative hypothesis whereby the mechanism for scour formation is unknown and may result from process other than supercritical flows.

Грязевые вулканы

СХЕМЫ СТРОЕНИЯ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ

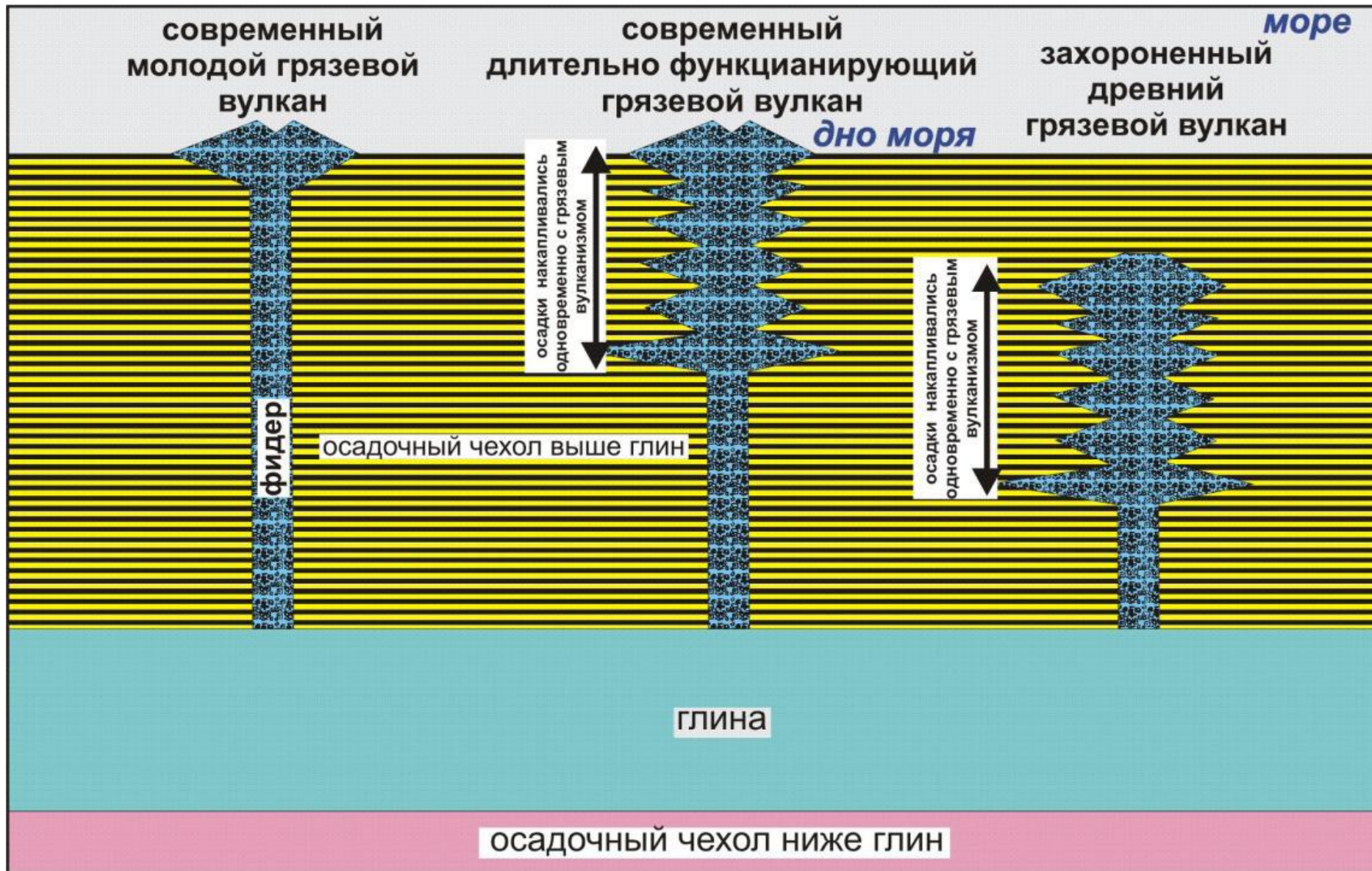




Фото А.В. Митюкова

Тамань

Майкопские грязевые вулканы

Керченский полуостров



Таманский полуостров

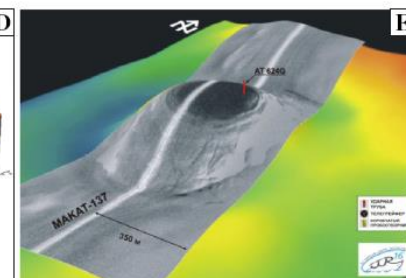
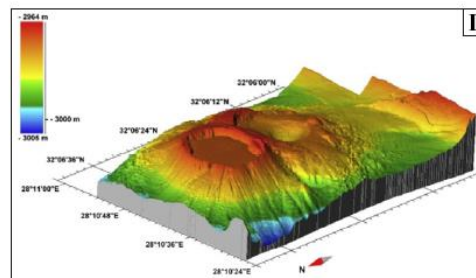
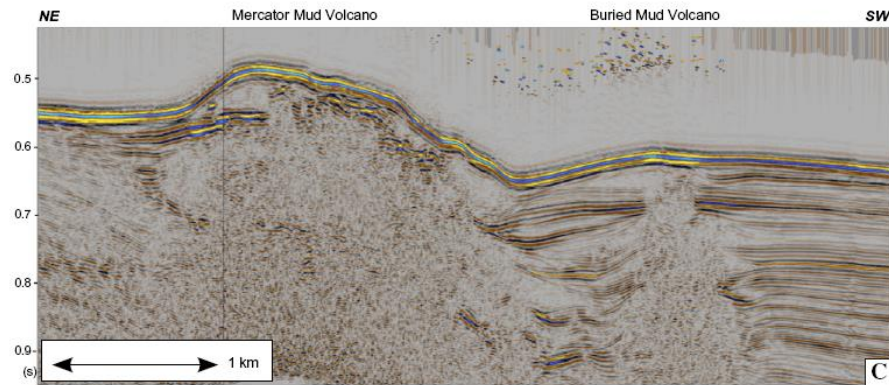
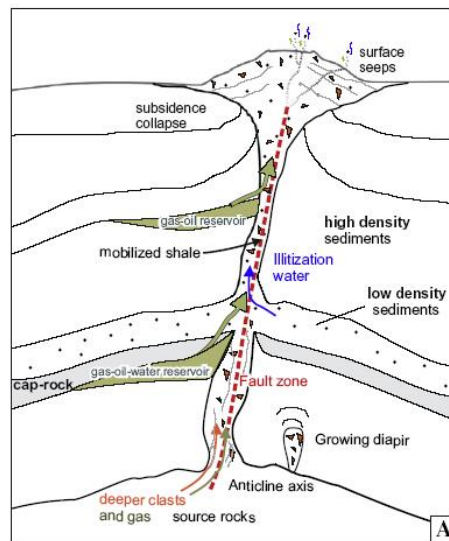


Тамань, грязевые вулканы





Тамань, грязевой вулкан



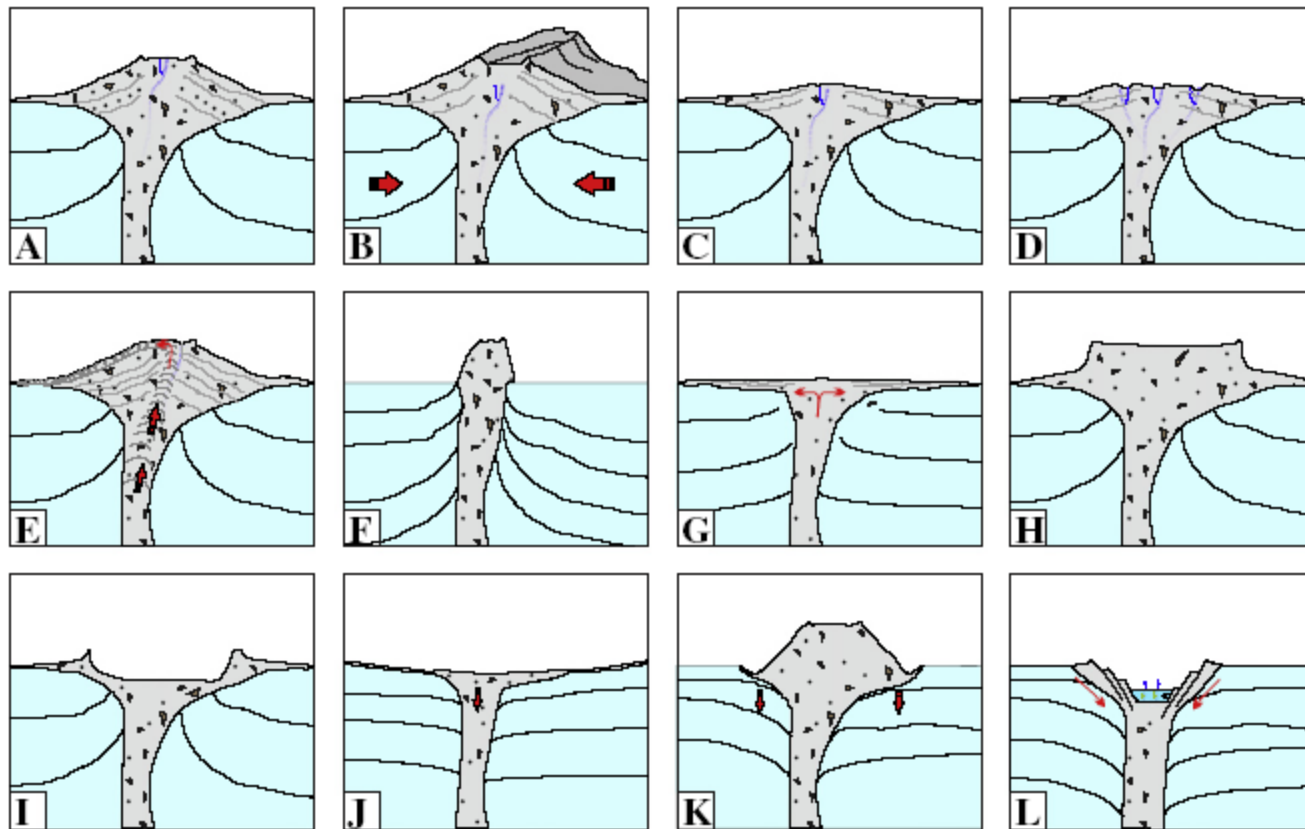


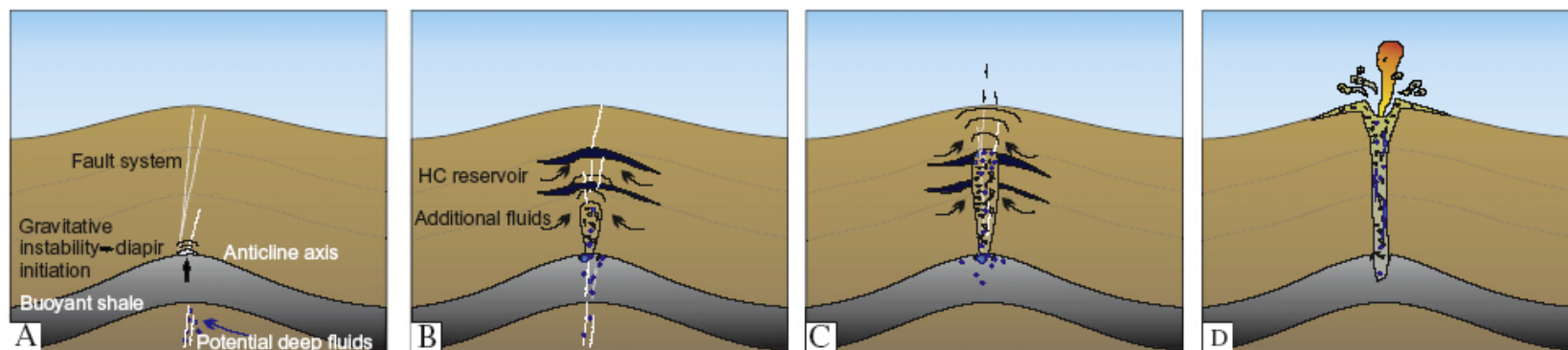
Fig. 3. Various morphologies of MVs: (A) conical, (B) elongated, (C) pie-shaped, (D) multicrater, (E) growing diapiir-like, (F) stiff neck, (G) swamp-like, (H) plateau-like, (I) impact crater-like, (J) subsiding structure, (K) Subsiding flanks, (L) sink-hole type.



Fig. 4. Various morphologies and features present in MVs. (A) The Touragay MV, Azerbaijan, is one of the largest onshore MVs displaying a typical conical morphology with a 500 m wide crater and a ~4.5 km wide conical shape. (B) Napag MV, Iran, with a tall conical feature in its central part (90 m wide) surrounded by a flat area where concentric collapse occurs (cfr. Fig. 5G). (C) Impact crater-like morphology for Bakhar satellite MV with gryphons and pools in its central part (D) Small conical gryphon (2 m in diameter) at the Salse di Puianello MV, Italy. Note the oil seepage. (E) Digity MV, Trinidad, consisting of a single gryphon of a few meters in height. (F) Swamp-like morphology for Palo Seco MV, Trinidad, with numerous interconnected pools and salsas inside the forest and with no substantial elevation. (G) Impact crater-like Morne Diablo MV, Trinidad, where the whole crater is occupied by a large lake. (H) Sink-hole type Naftliche MV, Iran, with a central crater (up to 150 m wide) hosting a lake where gas and water seepages occur. (I) Salse di Nirano MV, Italy, with numerous gryphons and pools erupting fluids and mud inside a subcircular depression. (J) Bulganak MV, Crimea, with numerous scattered pools in a gently depressing crater.



Fig. 6. Various examples of gryphons from several MVs. (A) Gryphon field in Dashgil MV crater. Man for scale inside the field. (B) Large gryphon resulting from the merging of several confining gryphons. Inside the gryphon up to 15 different bubbling spots were observed. (C) Tall gryphon (mud cone) on Bakhar MV. The structure reaches 10 m in height (man for scale on the left side of the gryphon). (D–E) Craters of gryphons where oily fluids and methane are continuously seeping with the low viscosity mud. This periodically overflows on the flanks of the structures. (F) Large bubbles formed in a 1 m wide gryphon of Dashgil MV. The high viscosity mud contains mud breccia clasts visible also on the bubble rim before the bursting. (G) Top view of a splatter gryphon. From the void conduit bursts of mud are intermittently ejected.



Diapir initiation in buoyant shales with potential deep fluids migration along structural highs (e.g. anticline axes) or fault networks

Fluids migration from different units and overpressure increase, diapiric structure development and brecciation during its growth

Overpressured diapir reaches critical depth. Overburden cannot contain fluids rich diapir. System in unstable conditions ready for triggering

Blast of gas. The sudden pressure release allows large amount of fluidized and gas saturated sediments to reach the surface

Fig. 13. Cartoon sketching the growth stages of a MV from its initial subsurface formation to final manifestation on the surface with eruption of mud breccia. During its growth towards the surface, the piercement structure collects the contribution of different fluids and eventual reservoirs at different stages (e.g. arrows). Modified after Mazzini (2009).



Fig. 5. Combined DEM data and Quickbird satellite images of some of the MVs described herein. (A) Impact crater-like Bakhar satellite MV (Azerbaijan): a distinct internal crater can be observed in the centre of the low elevation feature. The remarkably deep crater highlights the explosive nature of the most recent eruption and the consequent collapse. (B) Multicrater Bakhar MV (Azerbaijan): Clusters of pools and gryphons are present throughout the feature. A clear crater cannot be distinguished since the eruptive activity of the volcano was not focused on a single location. (C) Growing diapiir-like Koturdag MV (Azerbaijan) with conical shape and different overlapping mud breccia flows distributing radially from the central crater. The crater diapiiric expulsion of mud breccia from the crater forms a tongue that extends towards the northern part of the volcano. (D) Elongated Lokbatan MV (Azerbaijan) with the most recent mud flow extending west (darker coloured mud breccia). An elongated graben frames the mud flow. Hundreds of extraction wells surround the MV. (E) Pie-shaped Dashgil MV (Azerbaijan) with mud breccia flows that extend predominantly towards the east following the dipping of the terrain. The crater can be seen on the western side of the structure. (F) Circular shaped Shongar MV (Azerbaijan) with a well-defined crater on its central part and numerous mud flows distributed concentrically. (G) Napag MV (Iran), with concentric collapse rings (yellow dashed lines) and a central elevated zone. The darkest coloured mud breccia flows, towards the south-west, erupted after the 2003 Bam earthquake. (H) Subsiding Gharniarigh MV (Iran) with a central island inside the crater.

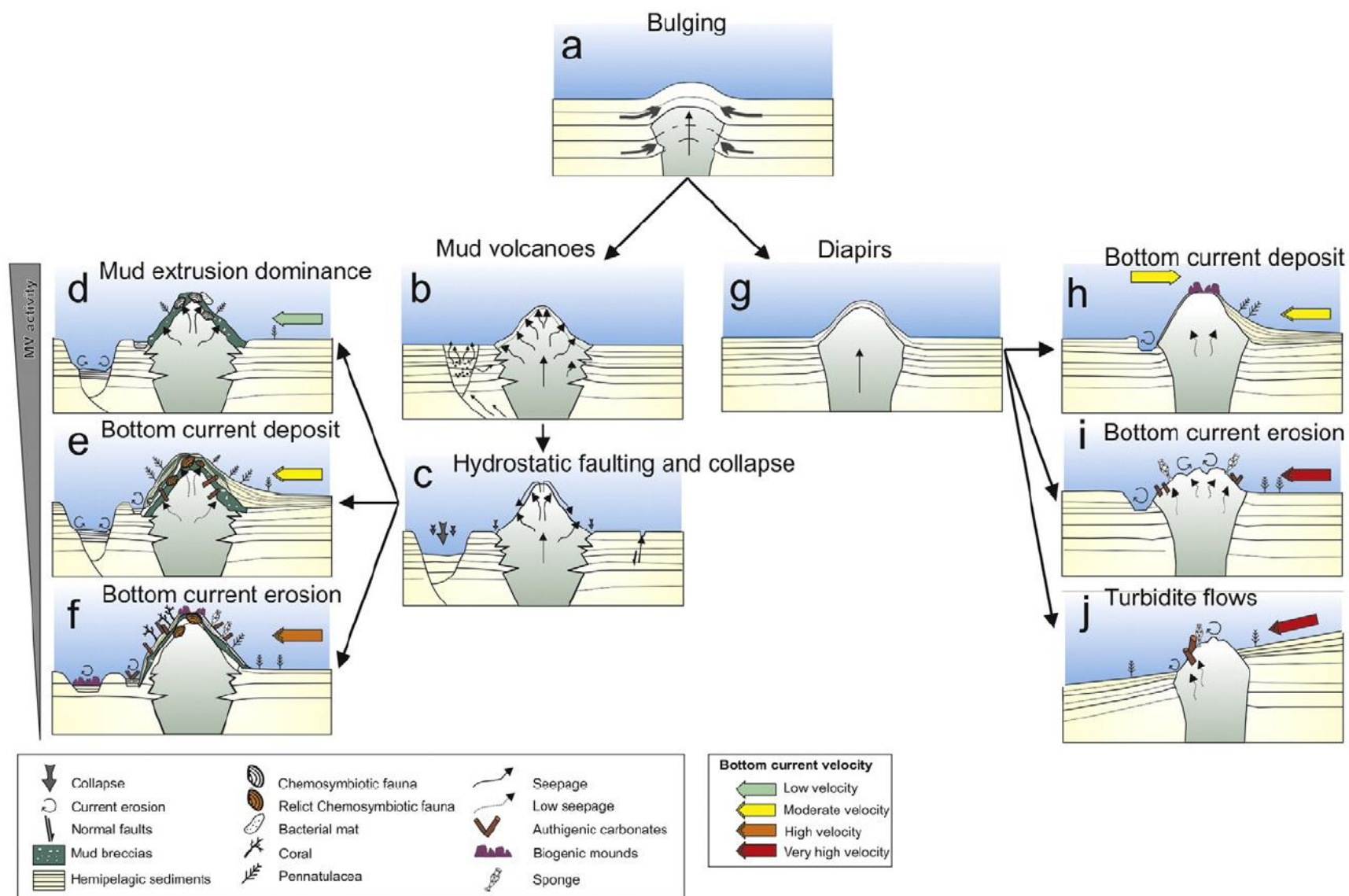
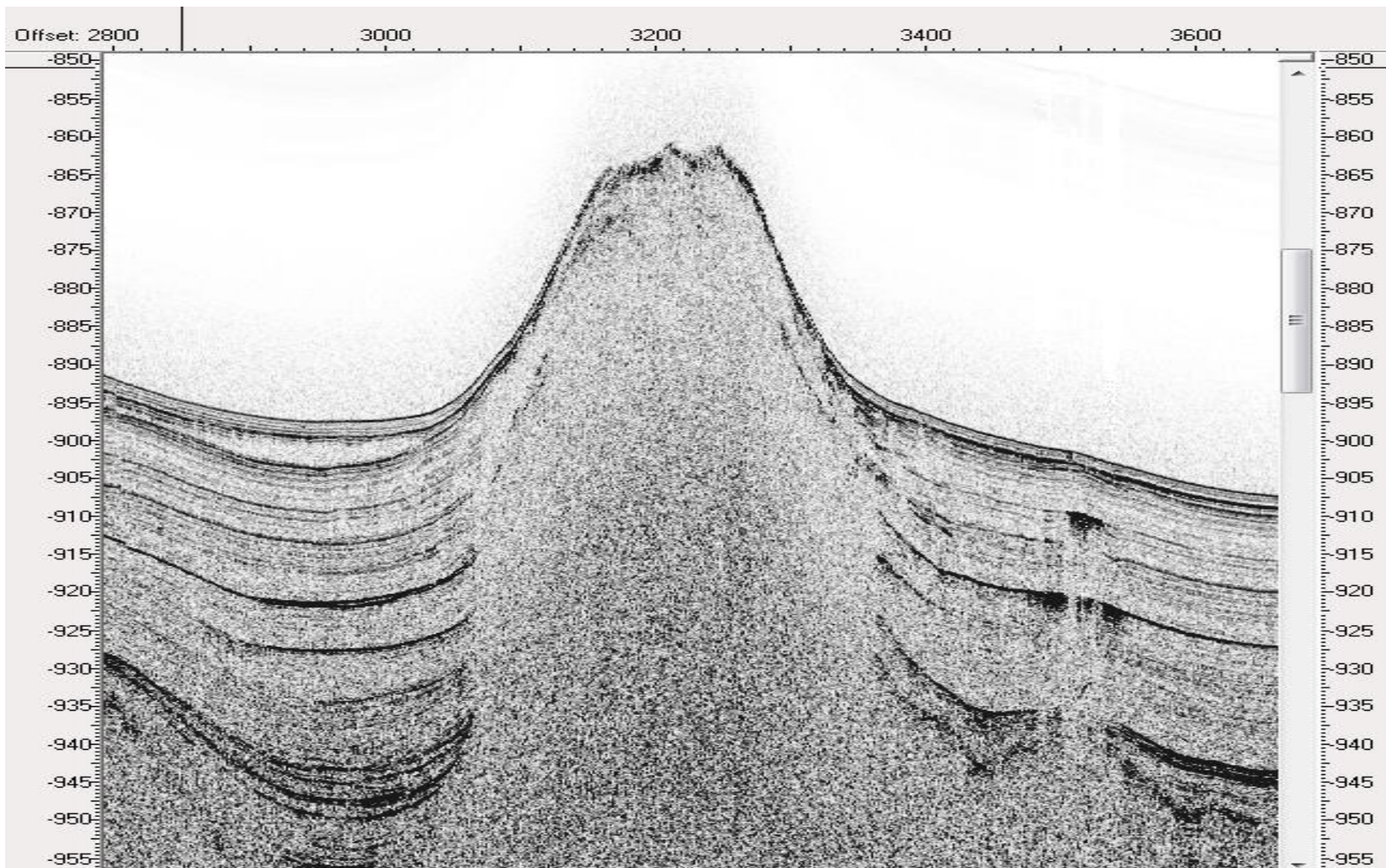


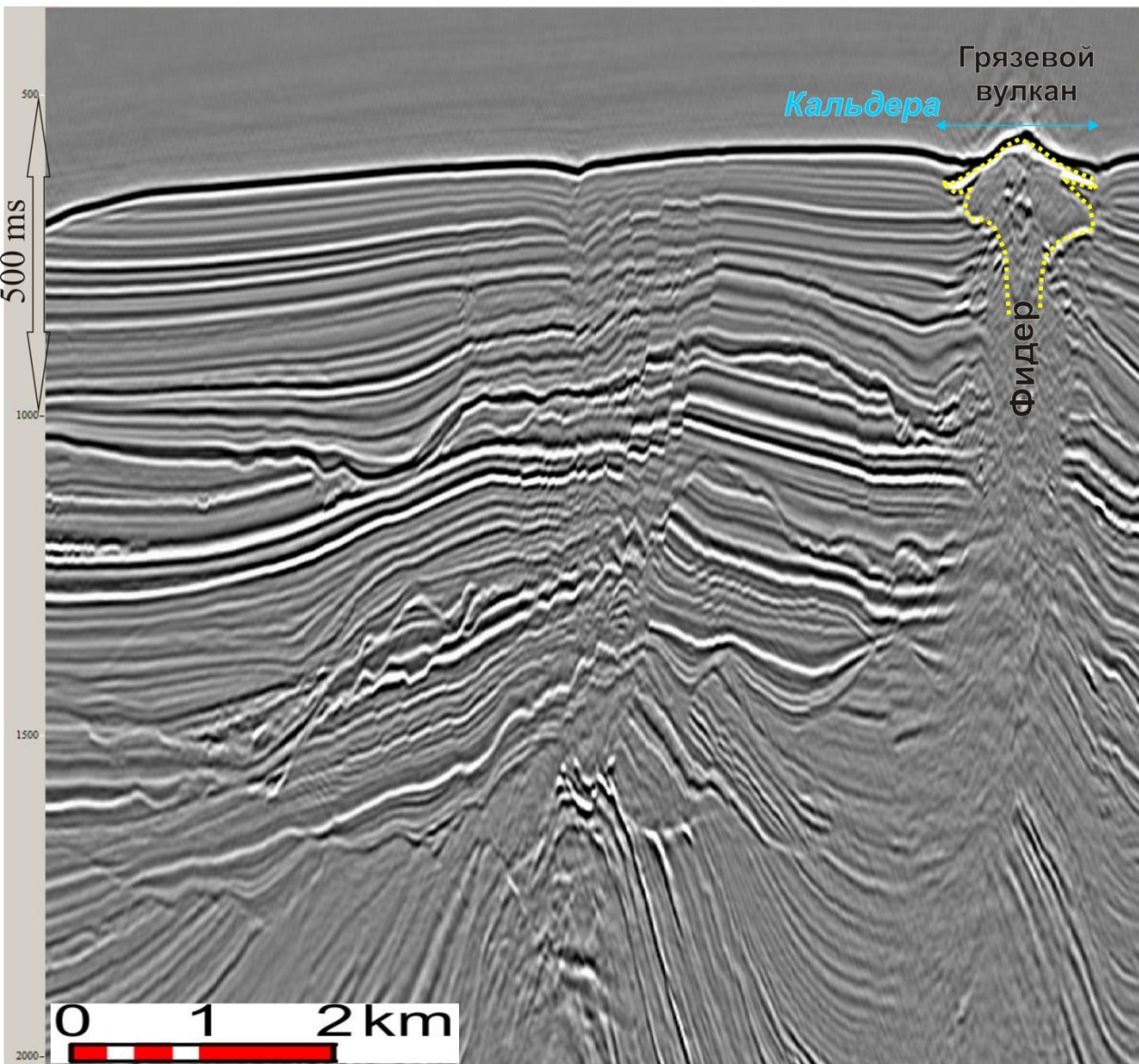
Fig. 9. Stage model showing the various developmental stages of the MVs and diapirs studied in the SFFE, related to mud extrusion and seepage and the prevailing bottom currents.

Грязевой вулкан в Турецком секторе Черного моря



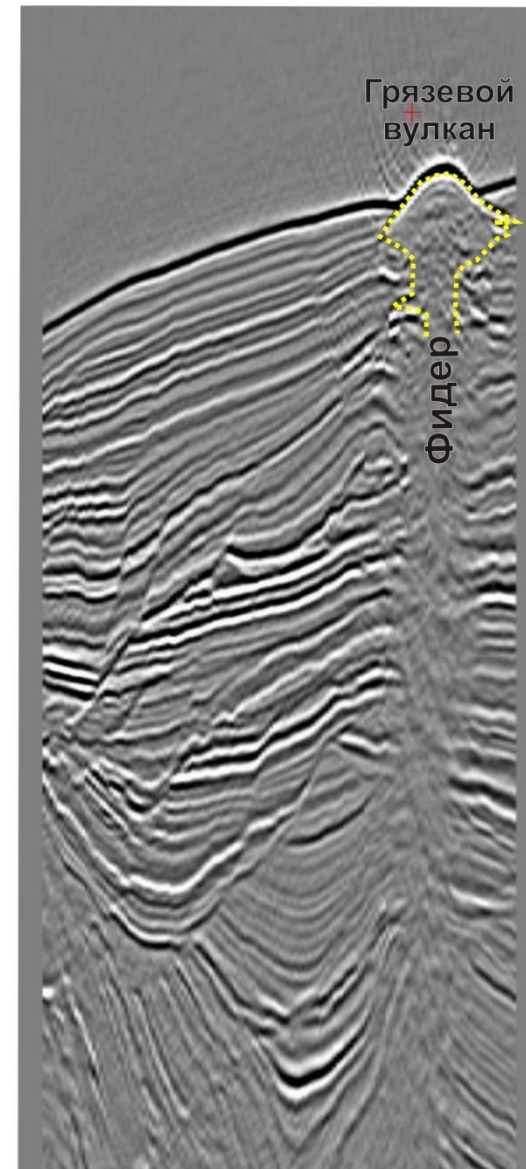
А.А. Иванова, МIRONЮК С. Г.,
РОСЛЯКОВ А. Г., ХЛЕБНИКОВА О. А.

А



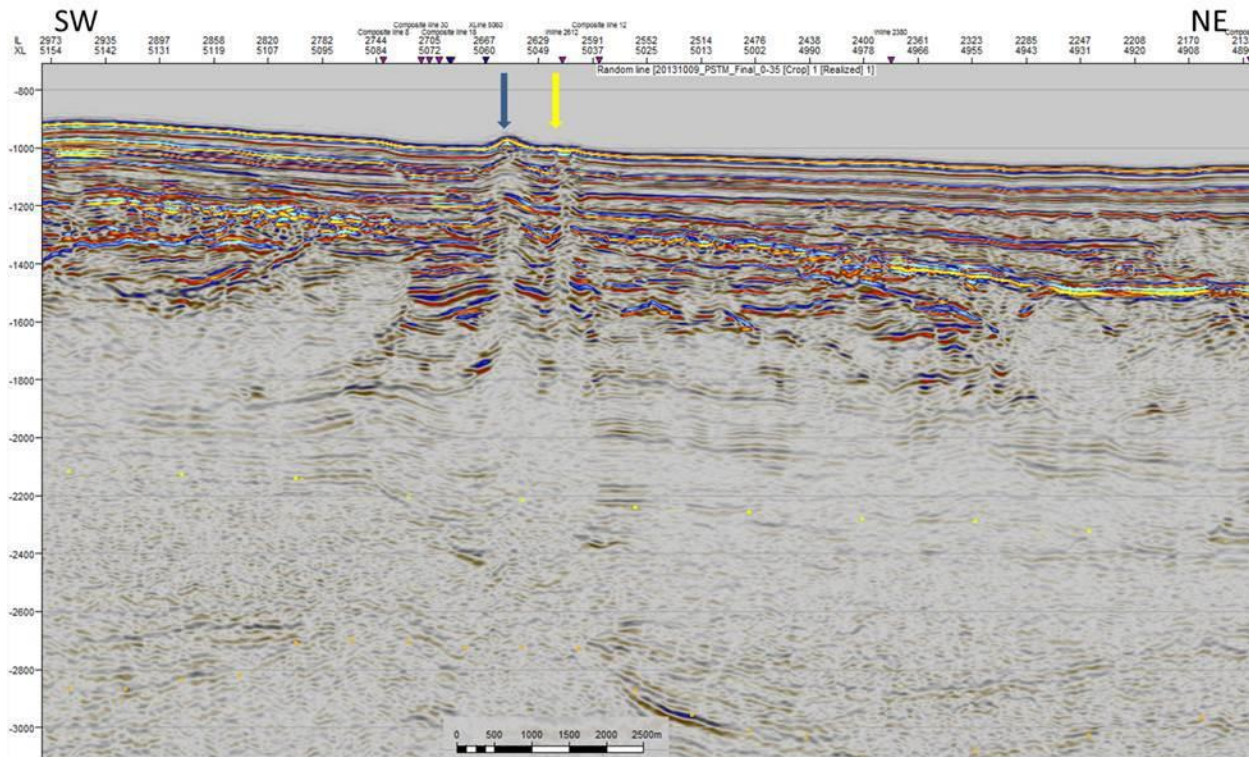
А'

В



В'

Черное море.
Наумова, 2019, Лукойл



Грязевой вулкан. Холм и воронка в рельефе дна моря (на карте батиметрии),
подводящие каналы, соединяющиеся на глубине (сейсмический профиль из куба 3Д)

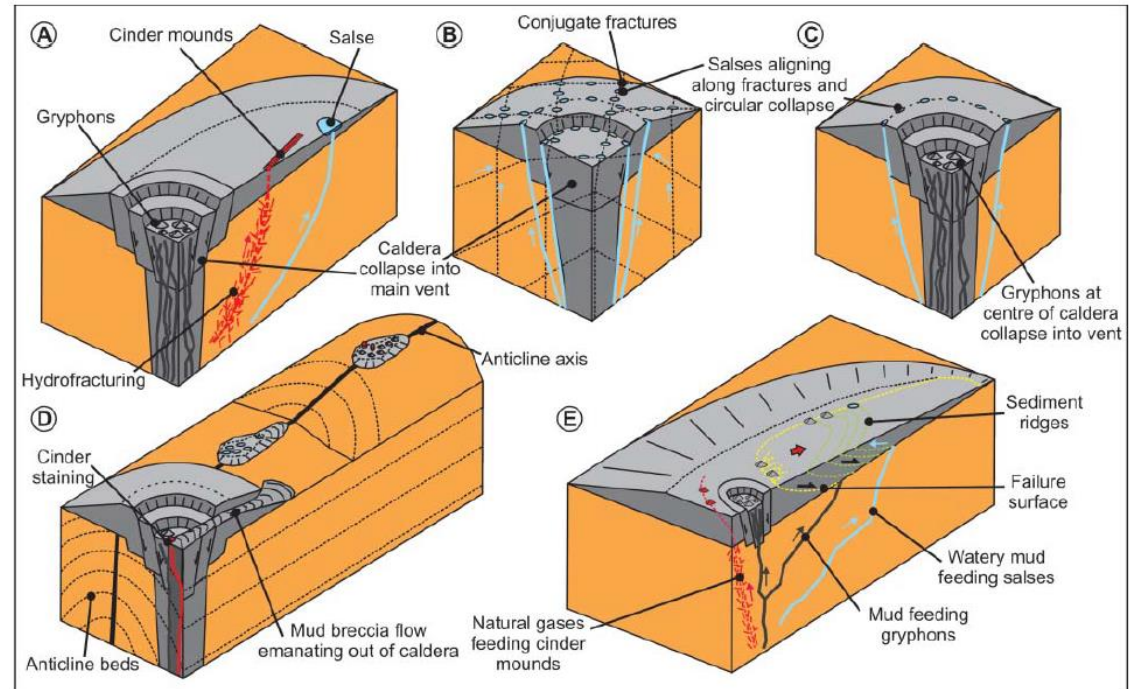


Fig. 10. Schematic illustrations of the structures that may cause the varying vent distributions. (a) Dashgil type, where some form of phase segregation is occurring at depth, allowing the gryphons to erupt in the area of caldera collapse, the cinder mounds to follow a linear area of weakness and so erupt in a line, and the watery salses to erupt further away from the main vent zone. (b) Kichik Kharami type, where small salses line up along pre-existing conjugate fractures and also concentrically at the centre of the edifice, where caldera collapse may be initiating. (c) Durovdag type, where some form of phase segregation is occurring at depth, allowing the gryphons to erupt in the central zone of caldera collapse beneath the main vent, with the watery salses erupting further away from the main vent zone along concentric ring faults produced during caldera collapse. (d) Koturdag type, where mud volcanoes can be seen aligning along anticline axes but have varying vent fluid compositions along the length of the anticline. (e) Akhtarma-Karadag type, where some form of phase segregation is occurring at depth, allowing the gryphons to erupt in the area of caldera collapse, the cinder mounds to follow a linear area of weakness and so erupt in a line, and the watery salses to erupt further away from the main vent zone along the detachment fault.

1026

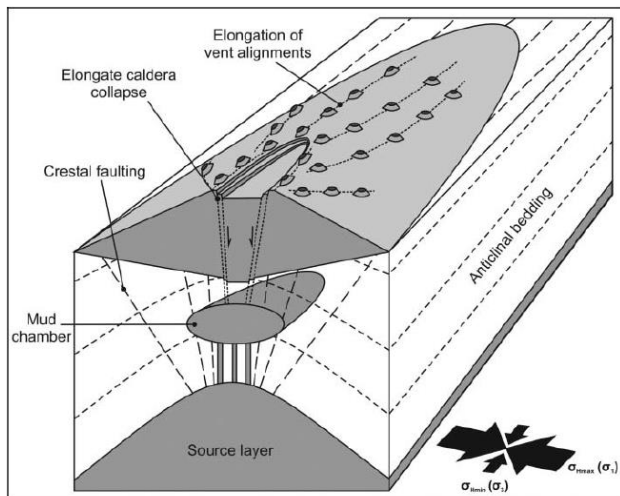
K. S. ROBERTS *ET AL.*

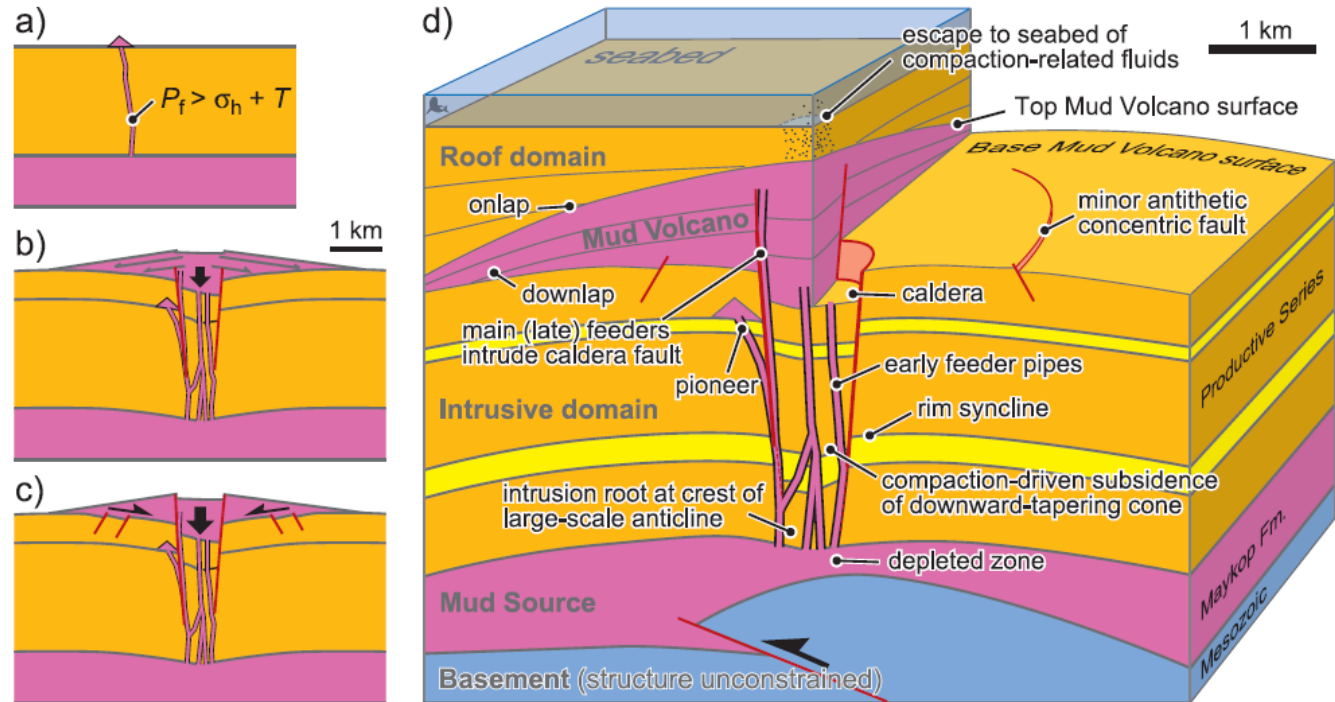
Fig. 11. Schematic model depicting mud volcano elongation, elongated vent distributions, mud chamber elongation and summit caldera elongation patterns. Mud dykes preferentially trend perpendicular to σ_{Hmax} taking advantage of the crestal faulting along the anticline. Summit calderas and mud chambers also become elongate perpendicular to σ_{Hmax} . After Paulsen & Wilson (2010).

Journal of the Geological Society, London, Vol. 168, 2011, pp. 1013–1030. doi: 10.1144/0016-76492010-158.

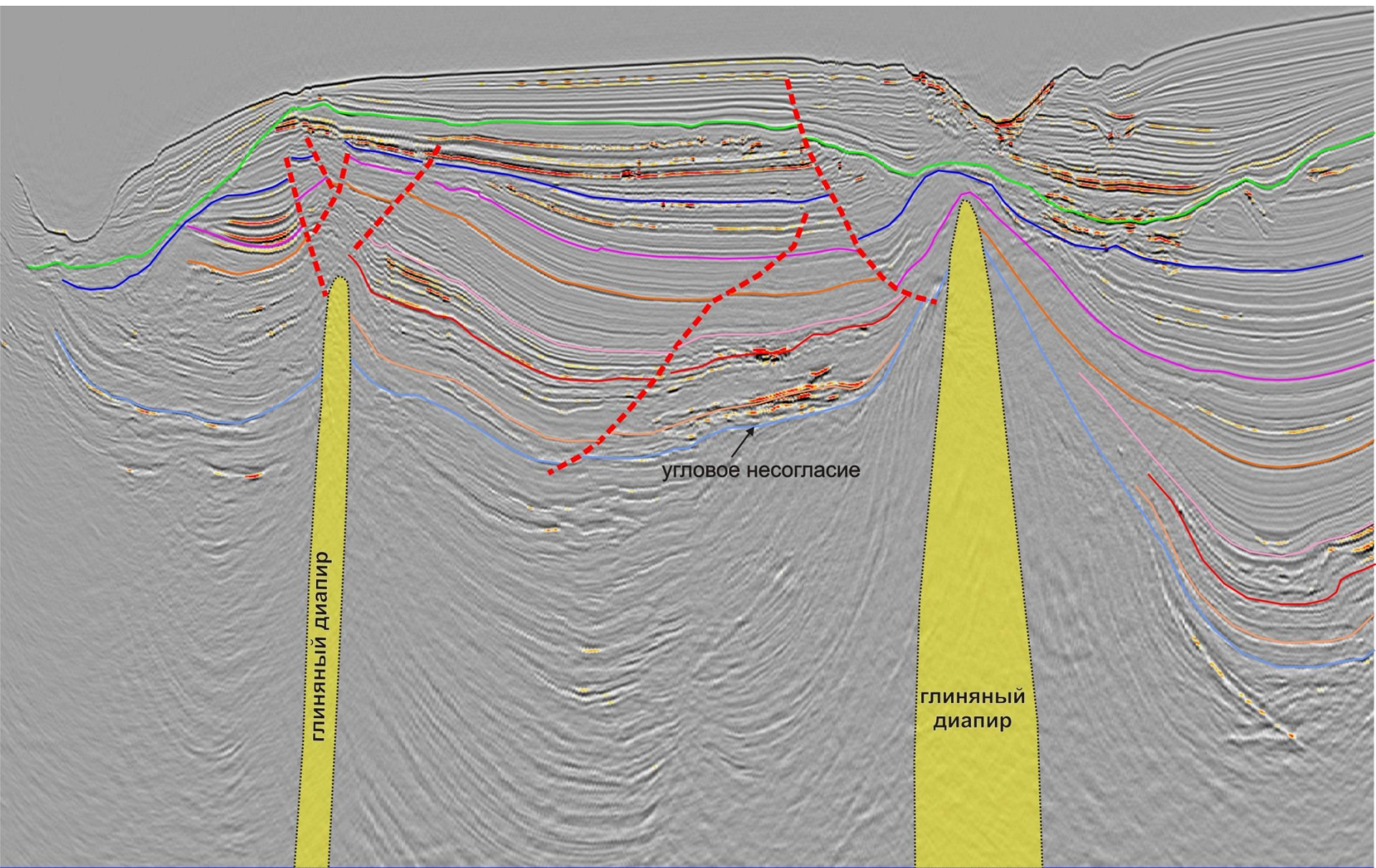
Structural controls on mud volcano vent distributions: examples from Azerbaijan and Lusi, east Java

KATIE S. ROBERTS^{1,2*}, RICHARD J. DAVIES¹, SIMON A. STEWART³ & MARK TINGAY⁴

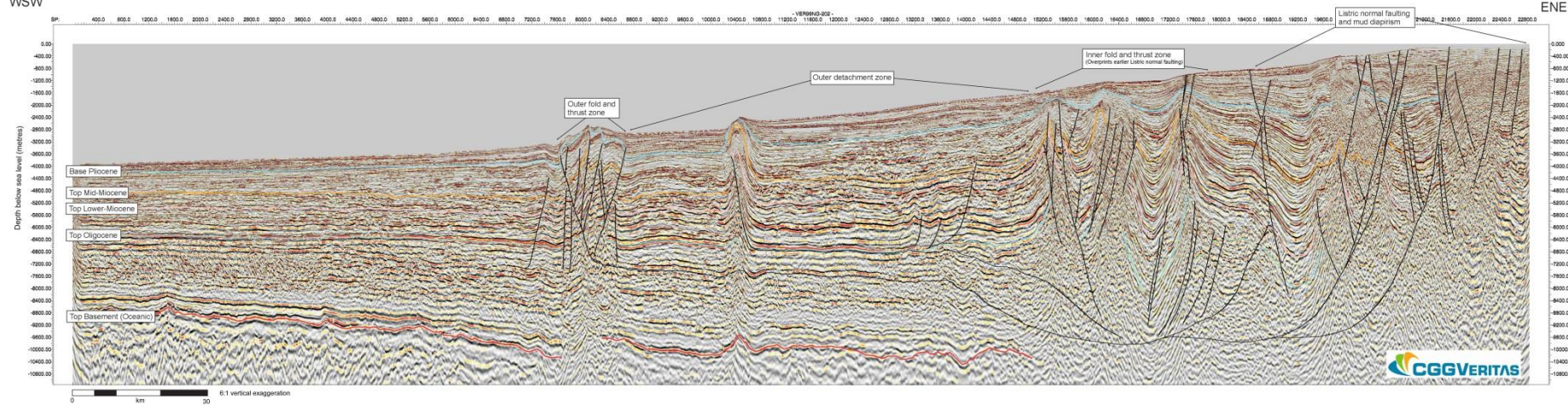
Figure 10. Diagrams of evolution and 3-D structural elements of model for mud volcano systems based on the mapping and interpretation described in this article. (a-c) Evolution through time from initial single pipe, feeding pioneer cone, through collapsed, heavily intruded downward-tapering cone and caldera underlying a sizable biconic edifice. (d) Three-dimensional summary model based on the mud volcano system illustrated in Figures 6-8. P_f = fluid pressure; σ_h = horizontal stress; T = tensile strength of overburden.



Глиняные диапиры

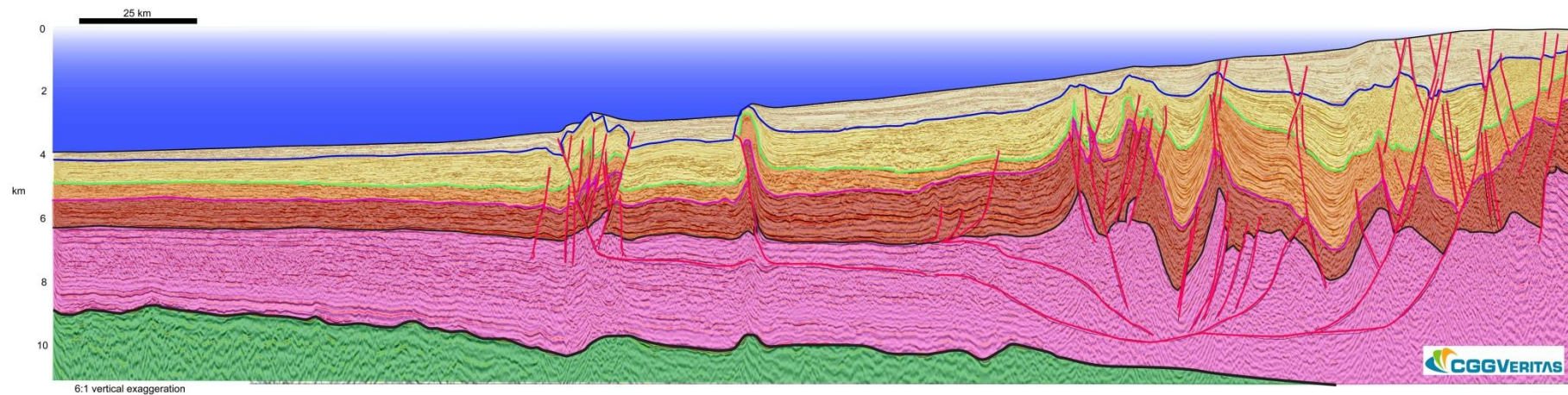


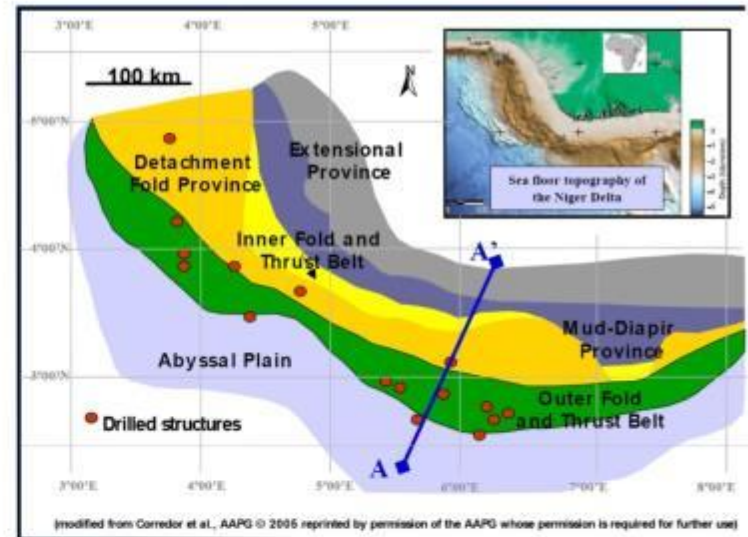
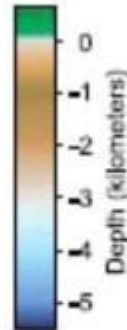
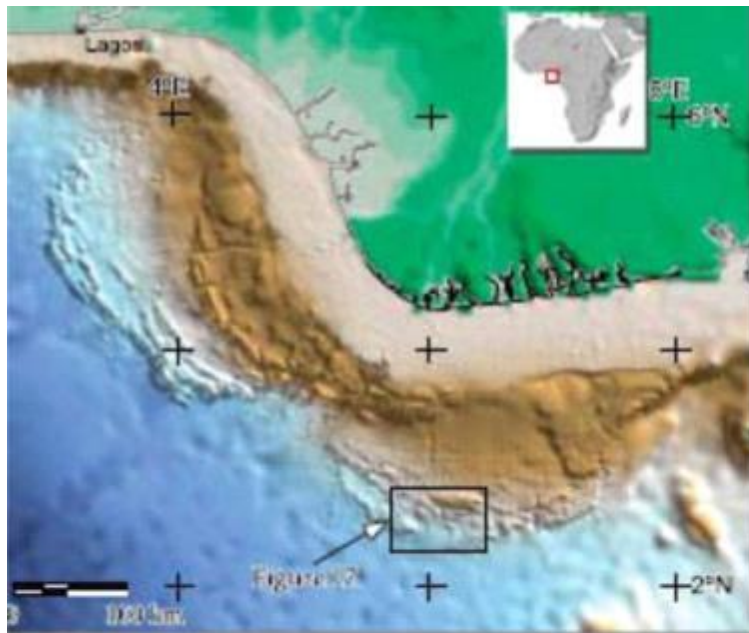
WSW



ENE

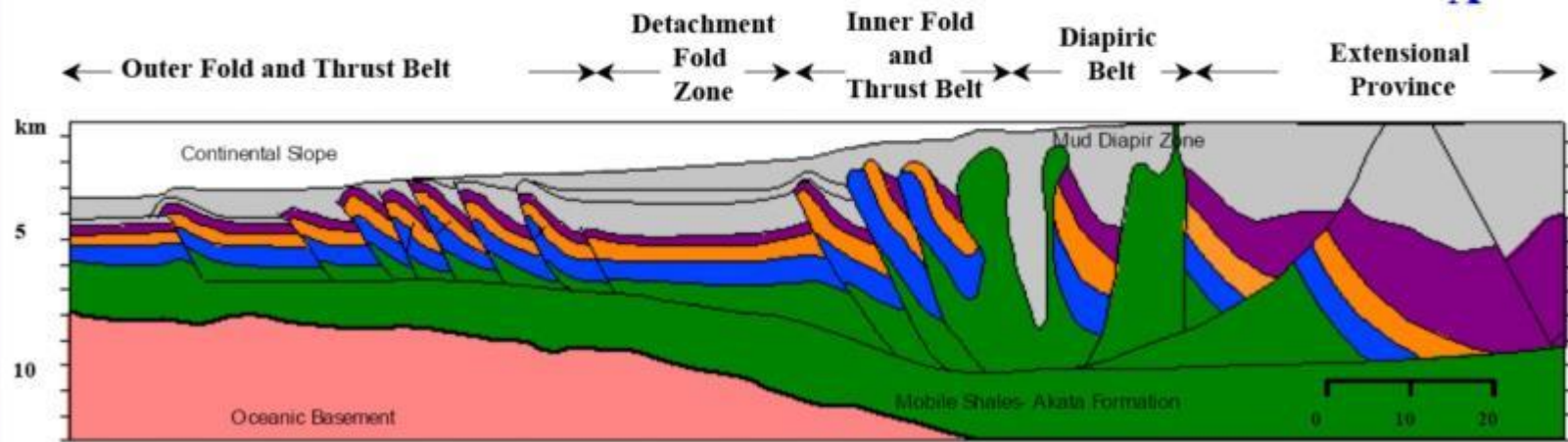
WSW





A

A'



(modified from Corredor et al., AAPG © 2005 reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)

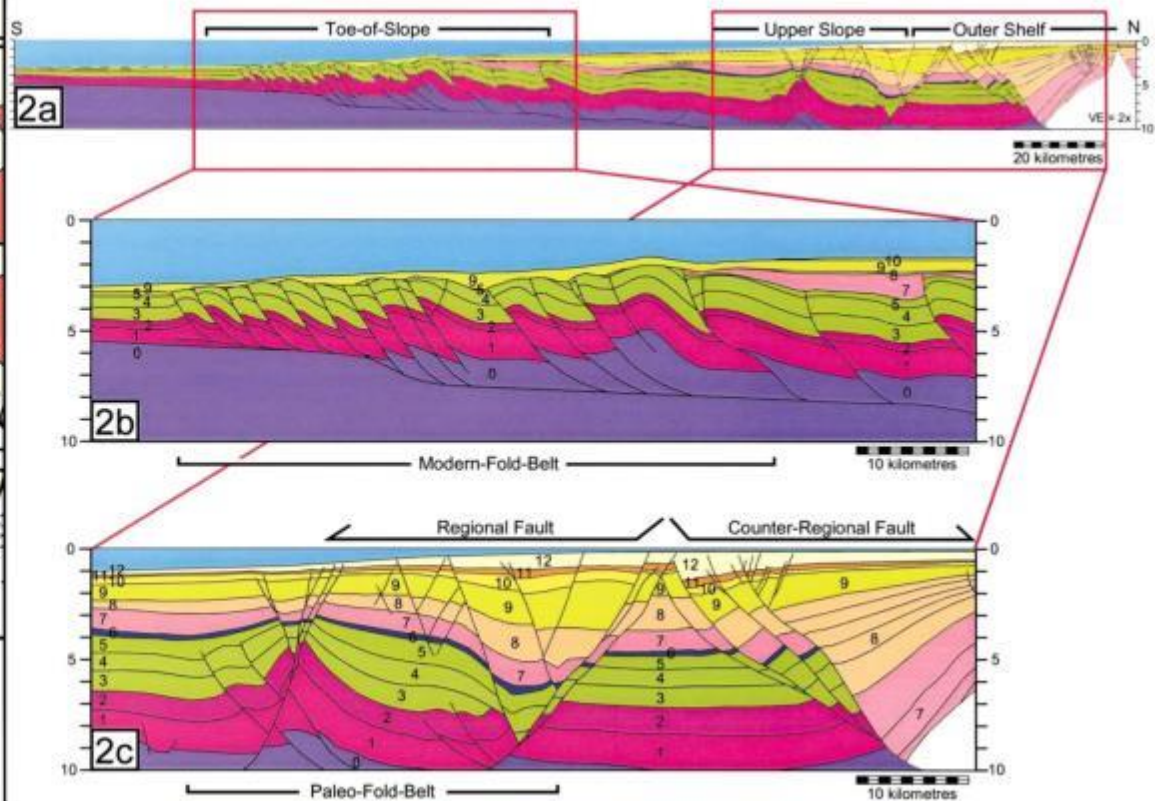
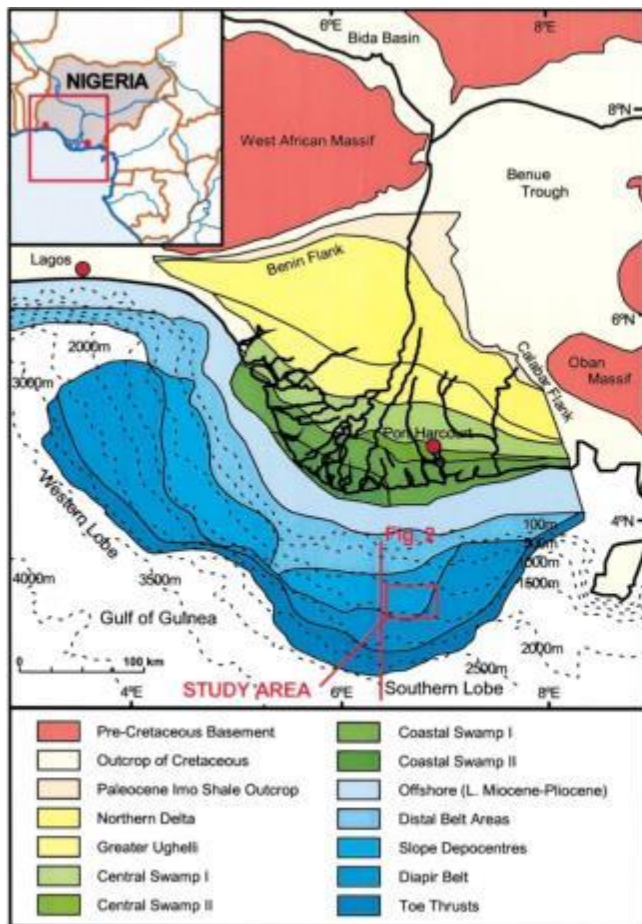
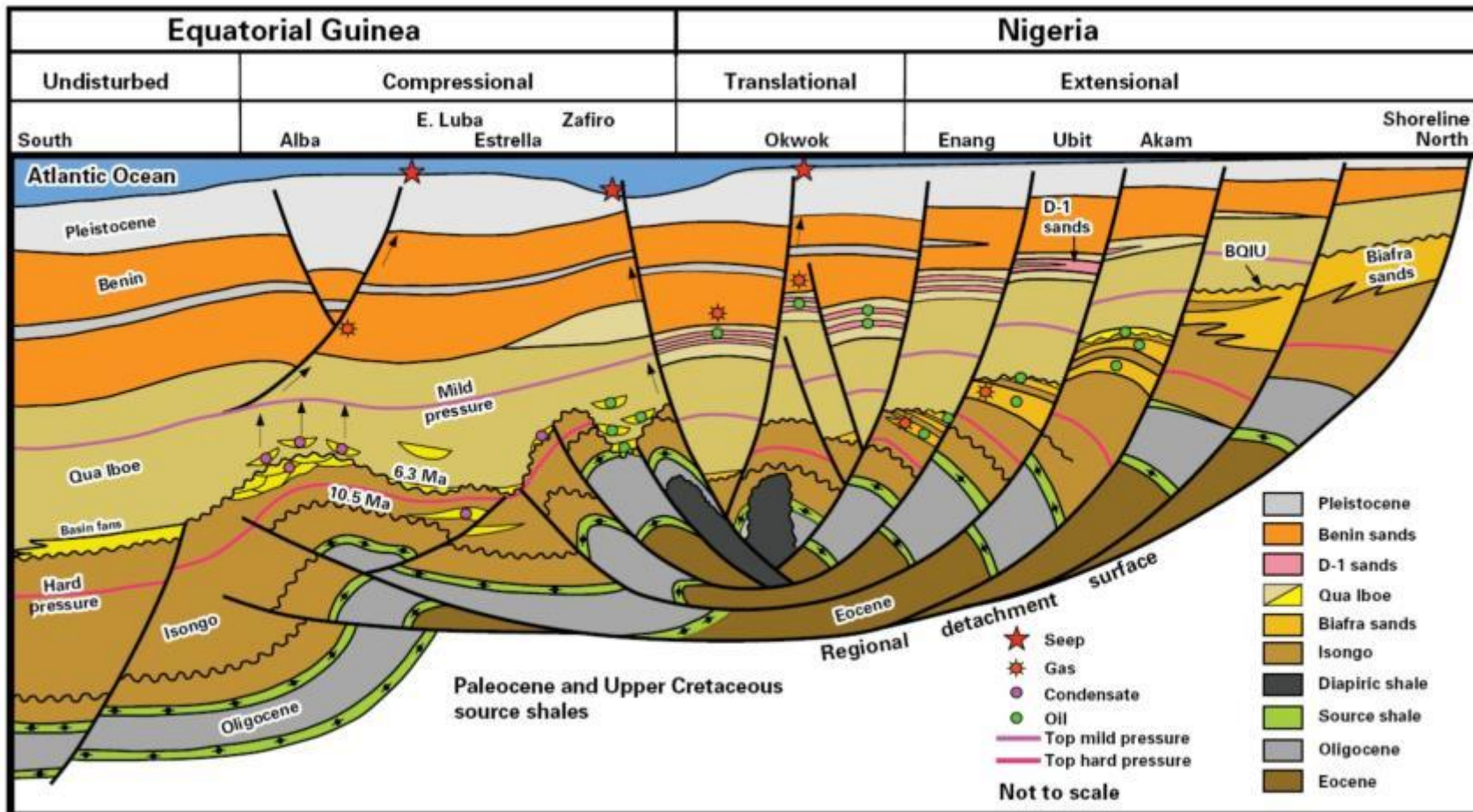
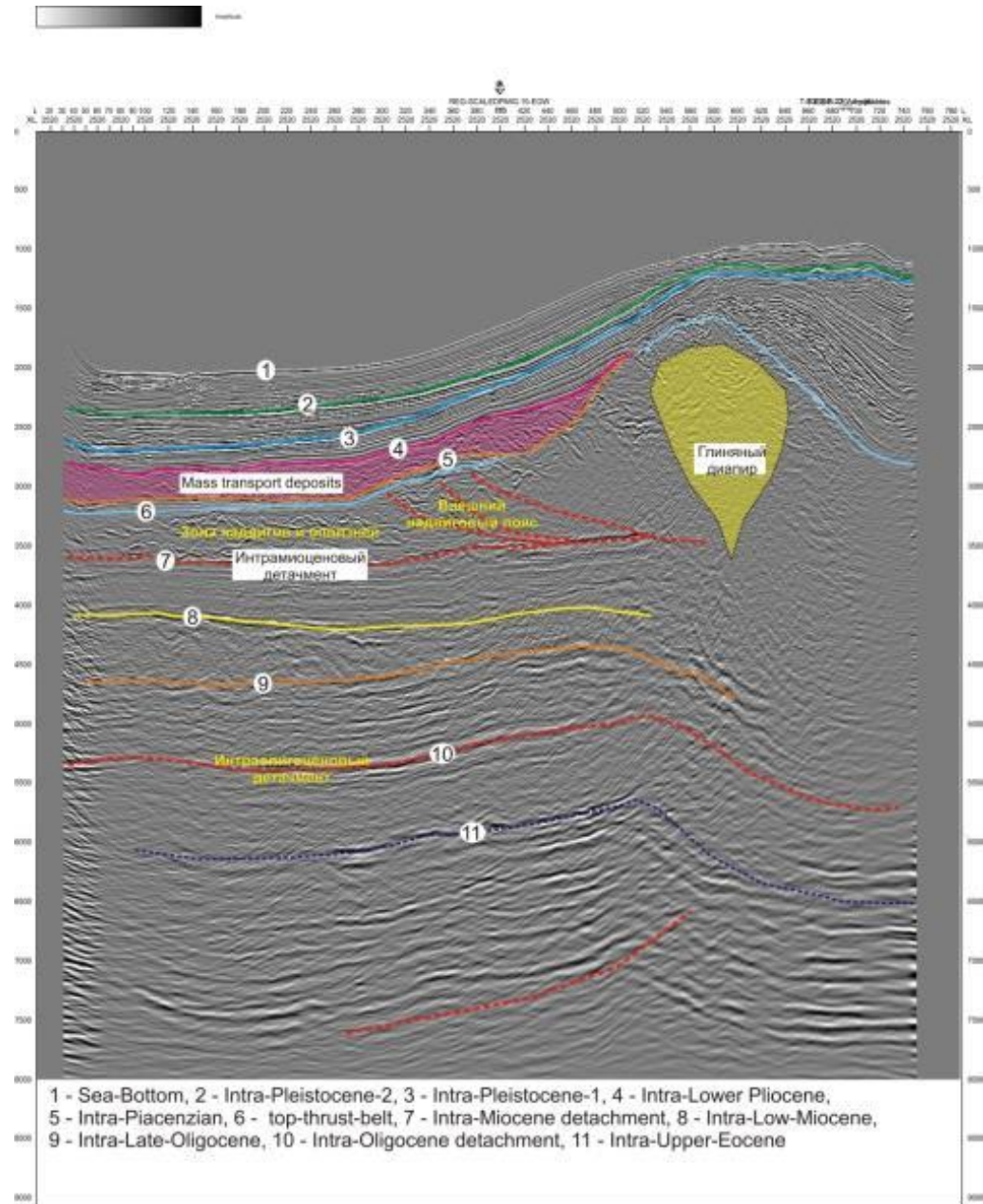


Схема строения рельефа и геологической структуры дельты Нигера и генерализованные разрезы поперек дельты



Схематический разрез через восточную часть дельты Нигера с показом элементов углеводородной системы



Разрез поперек дельты, на котором выделены основные границы

А. Никишин, В. Никитина

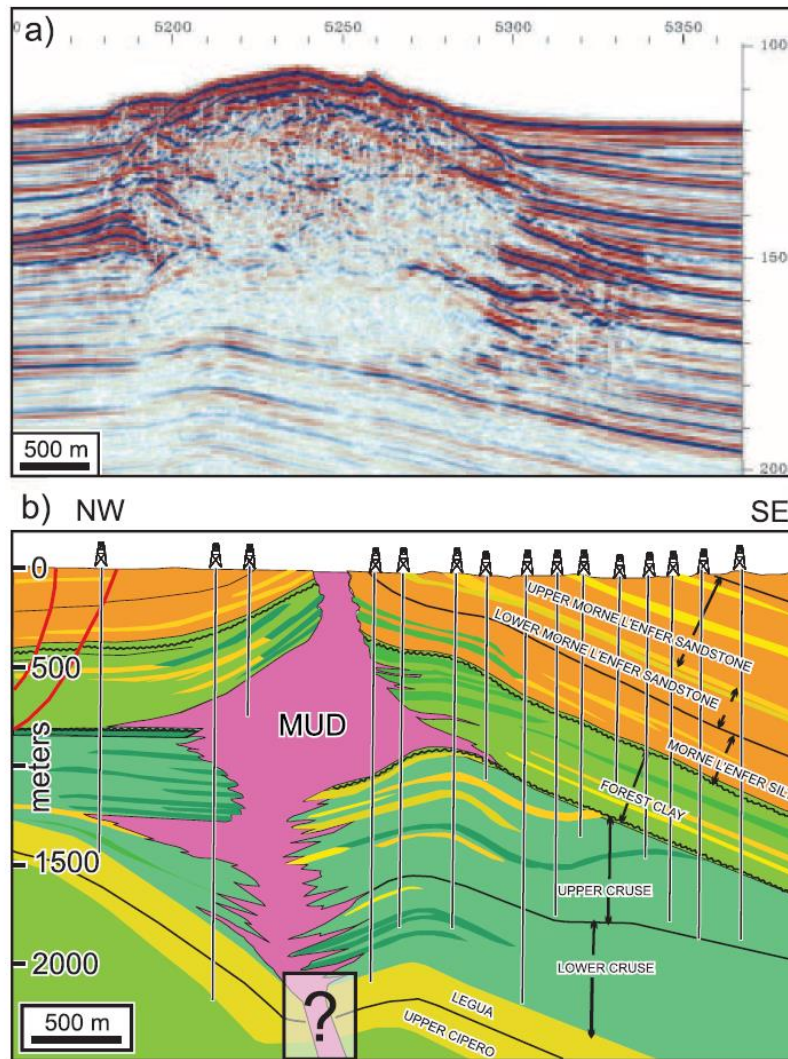


Figure 3. (a) A South Caspian volcanic edifice showing the margins interdigitating with adjacent sediments, reflecting the variation in the rate of extrusion relative to background sedimentation. (b) Buried mud volcano with interdigitating margins, Trinidad, reconstructed from well control (modified from Deville et al., 2003). As in Figure 2c, the subvolcano structural elements are poorly constrained.

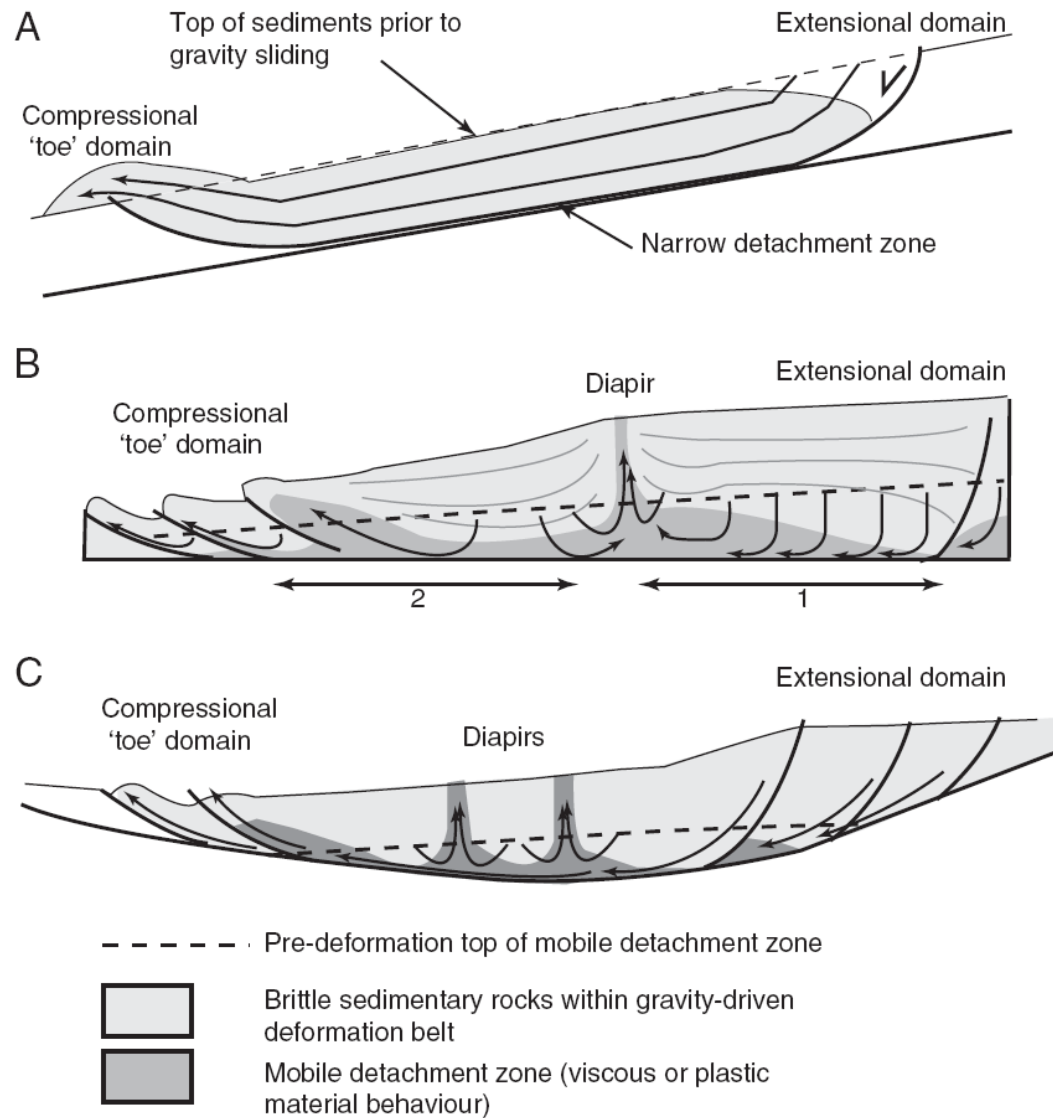


Fig. 6. Schematic illustration of gravity spreading and gravity gliding mechanism. A) Gravity gliding down an inclined slope on a thin detachment, B) Sediment loading causing gravity spreading employing a thick detachment zone on a flat detachment surface, C) mixed gravity gliding and gravity spreading on a thick detachment zone with both offshore and onshore inclined detachment surfaces.

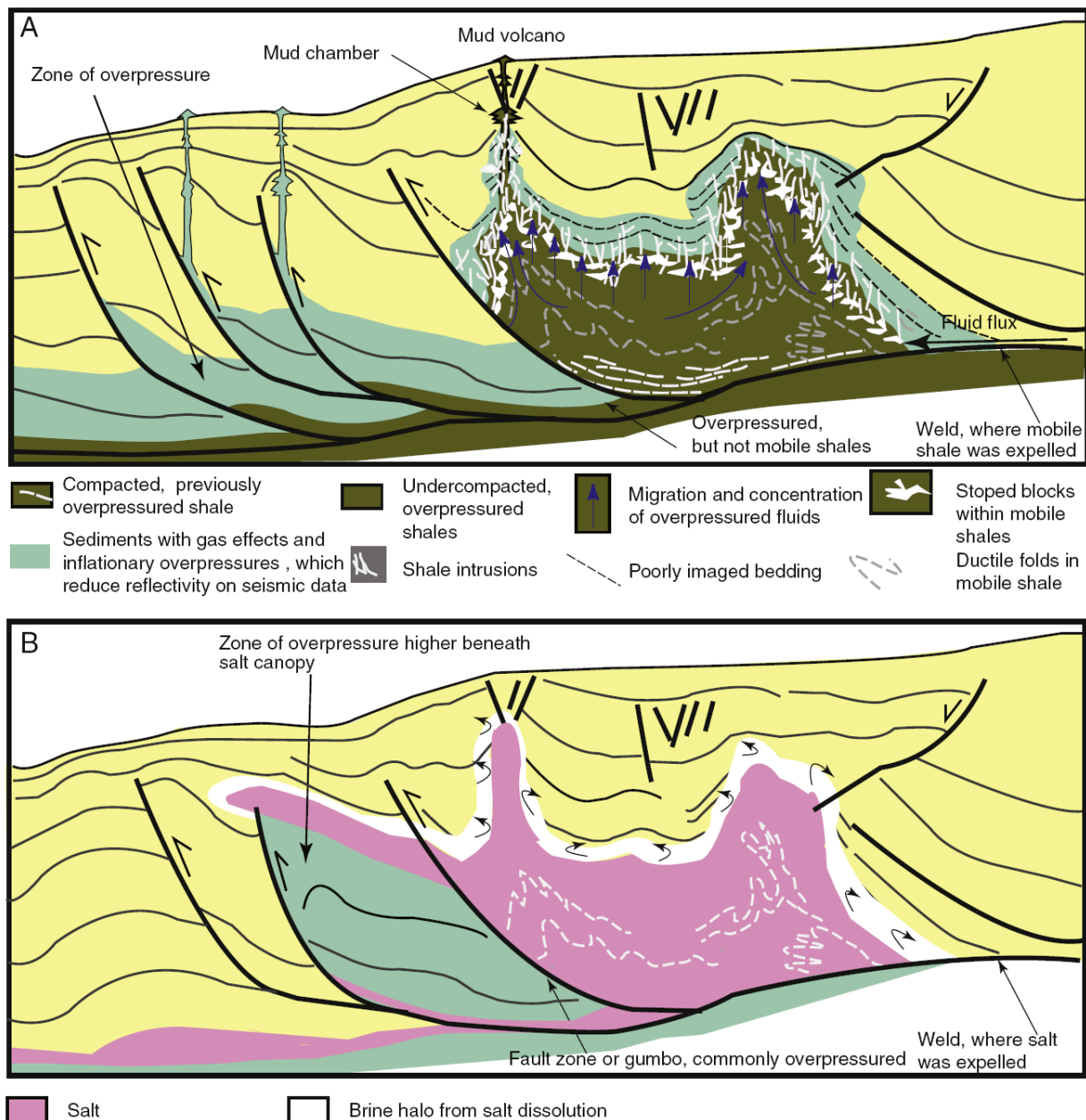
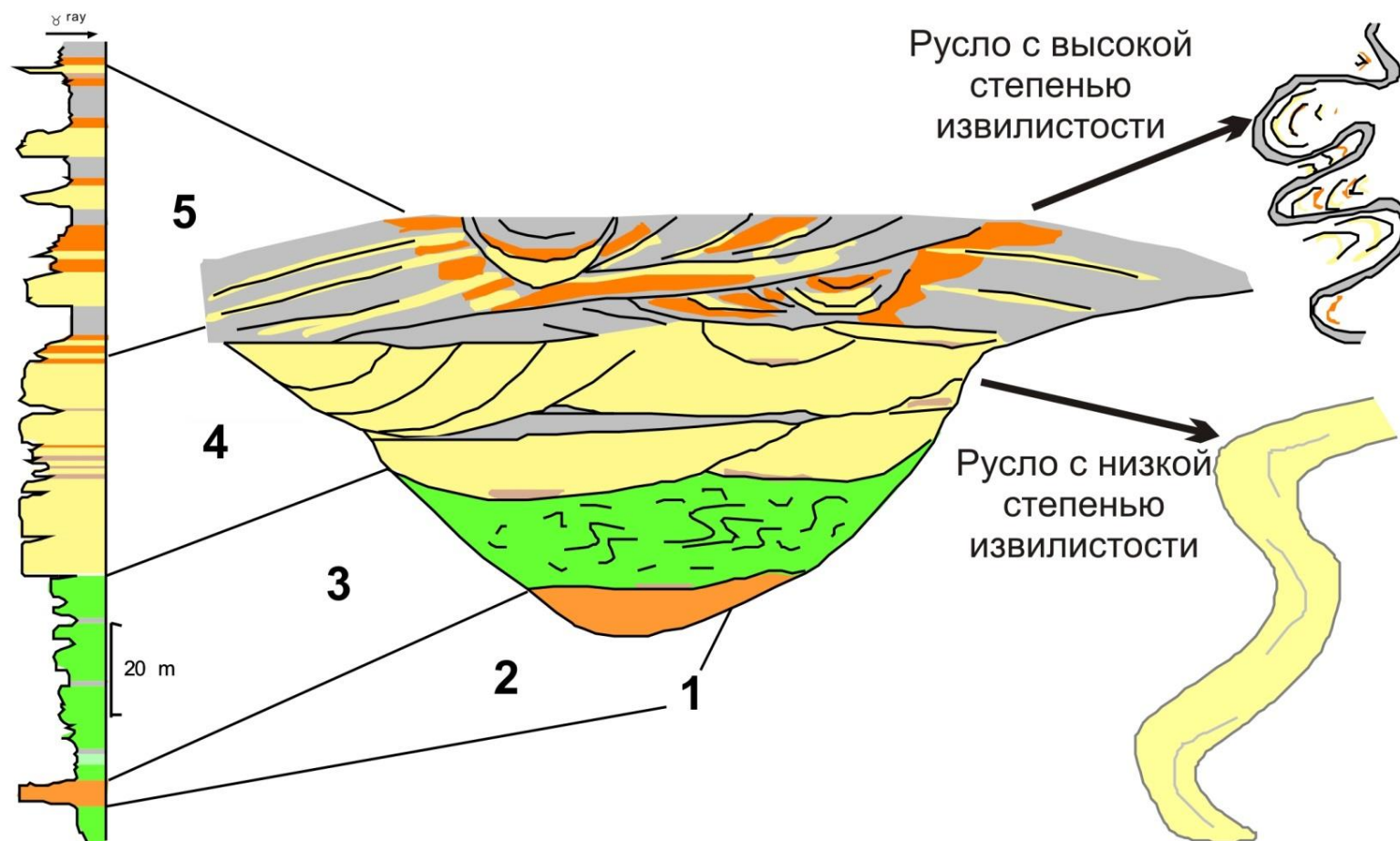


Fig. 7. Schematic comparison of structural style and overpressure distribution associated with thick mobile shale and mobile salt detachments. A) Mobile Shale, B) Salt. Partly based on Warren et al. (in press) and observations from the Niger Delta and Brunei Darussalam (Morley and Guerin, 1996; Van Rensbergen et al., 1999; Morley, 2003a,b).

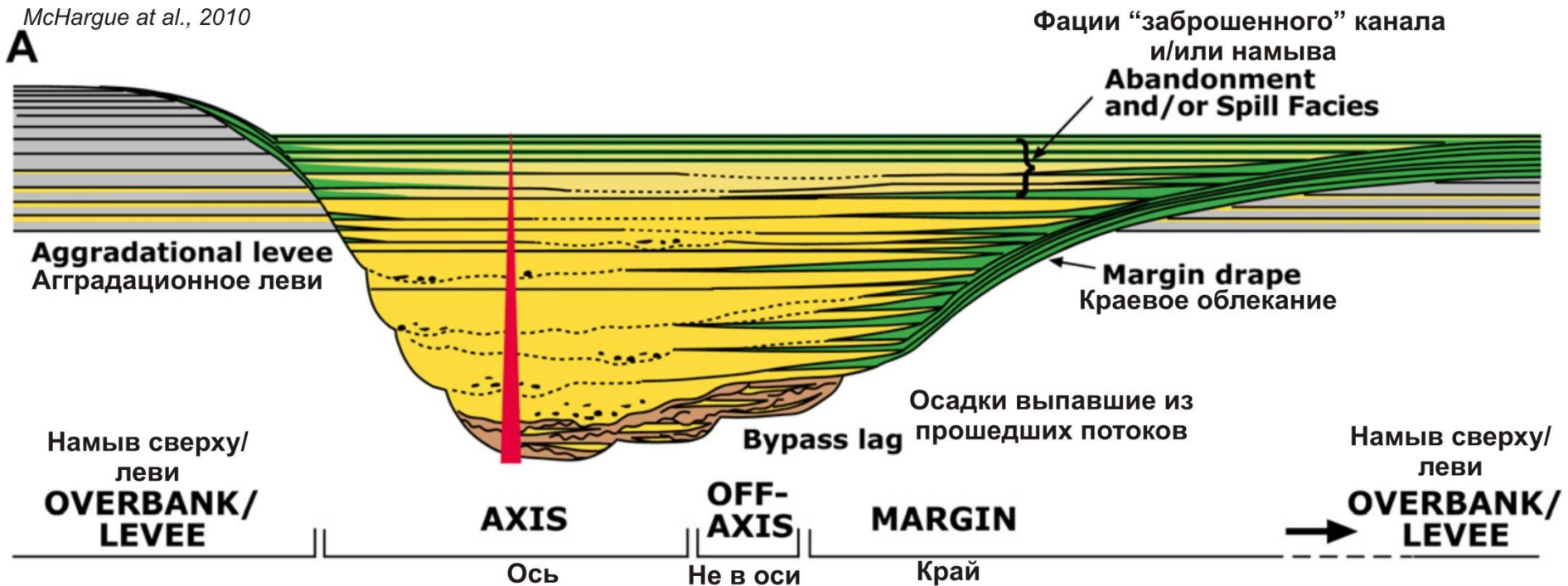
Фациальная модель заполнения системы крупного каньона

Mayall et al., 2007

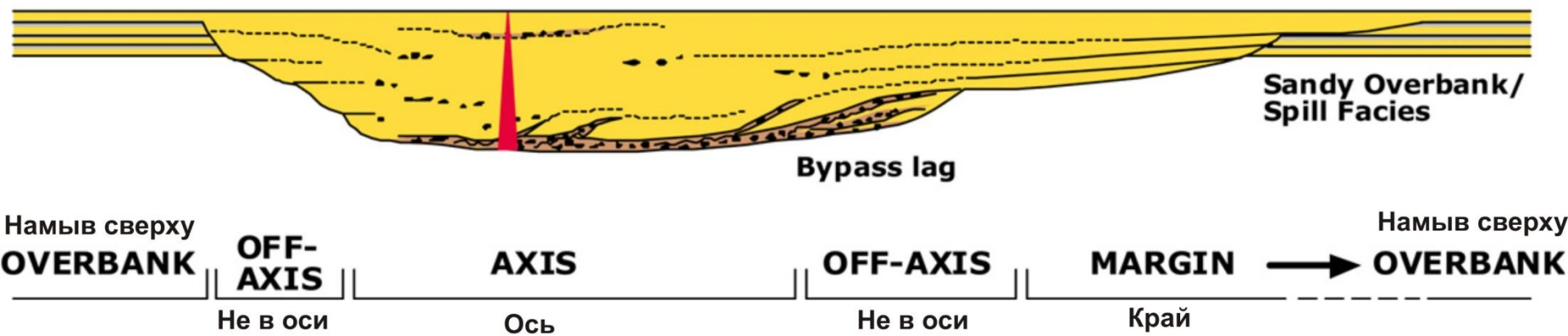


1 - эрозионная подошва, 2 - грубозернистые отложения (песчаники, гравий), конгломераты с кластами глин, слои глин, 3 - комплекс с оползновыми телами и обломочными потоками, 4 - комплексы с русловыми песчаниками, 5 - комплексы сильно извилистых обвалованных русел (leveed channels) с малой долей песчаников

A

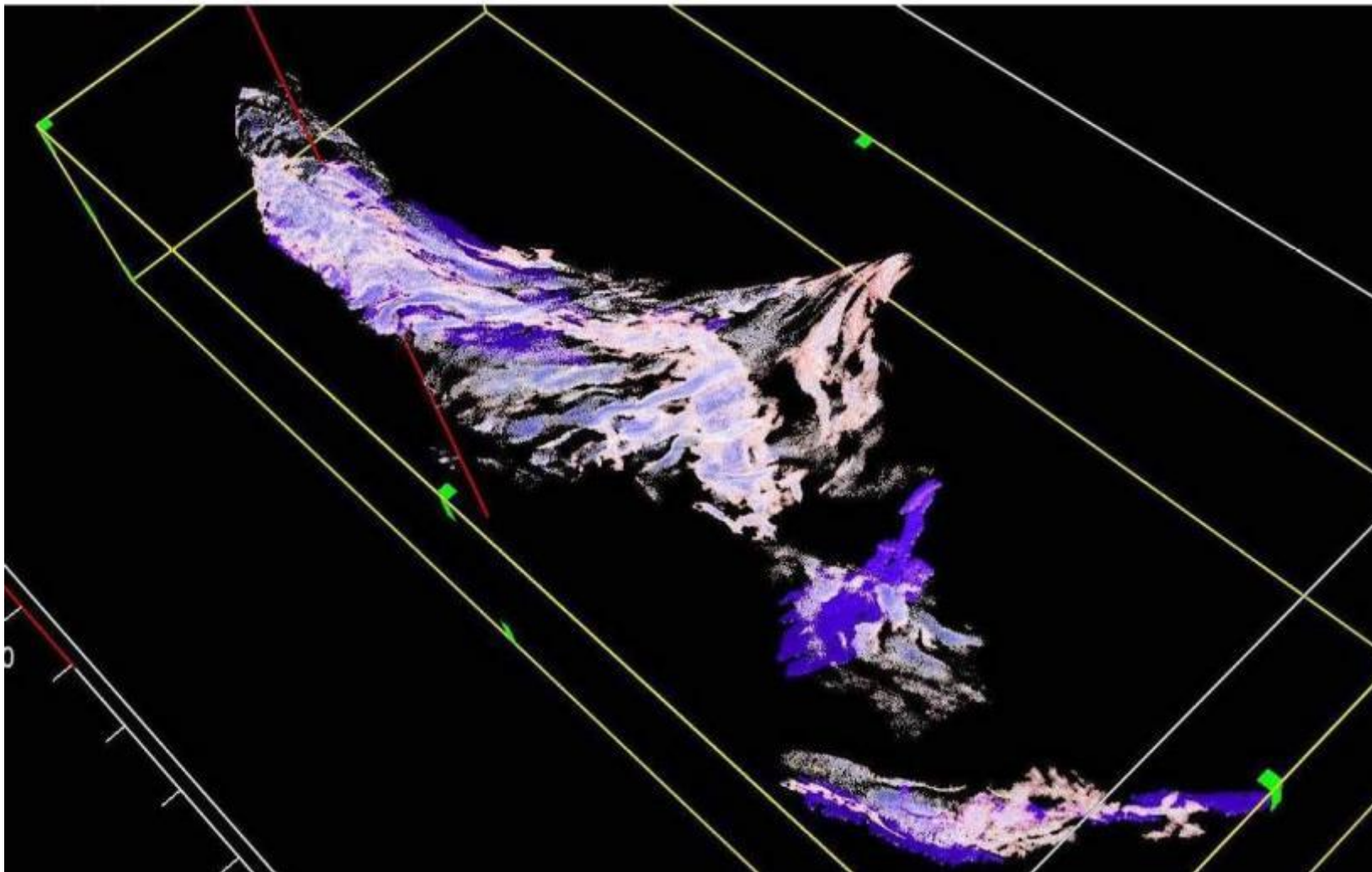


B



Schematic representations of common fill styles of under-filled and filled channel elements. Although the contrasting characteristics as illustrated here are common for these two channel types, variation is considerable. A: Under-filled channel element with moderate to high rate of overbank aggradation, semi-amalgamated highly heterolithic fill, common shale/silt drapes, and capped by upward fining abandonment-fill facies. B: Filled channel element with low rate of overbank aggradation, amalgamated and less heterolithic fill, and rare shale/silt drapes. Upward fining abandonment-fill facies is thin or absent. If the channel element is over-filled, sandy overbank deposits may be present. Yellow = sand-rich channel-fill sediments, Green = mud-rich channel-fill sediments, Brown = mud-clast-rich channel-fill sediments, Gray = mud-rich pre-existing sediments.

Channel systems, a fragment, 3D seismic data



Роснефть

