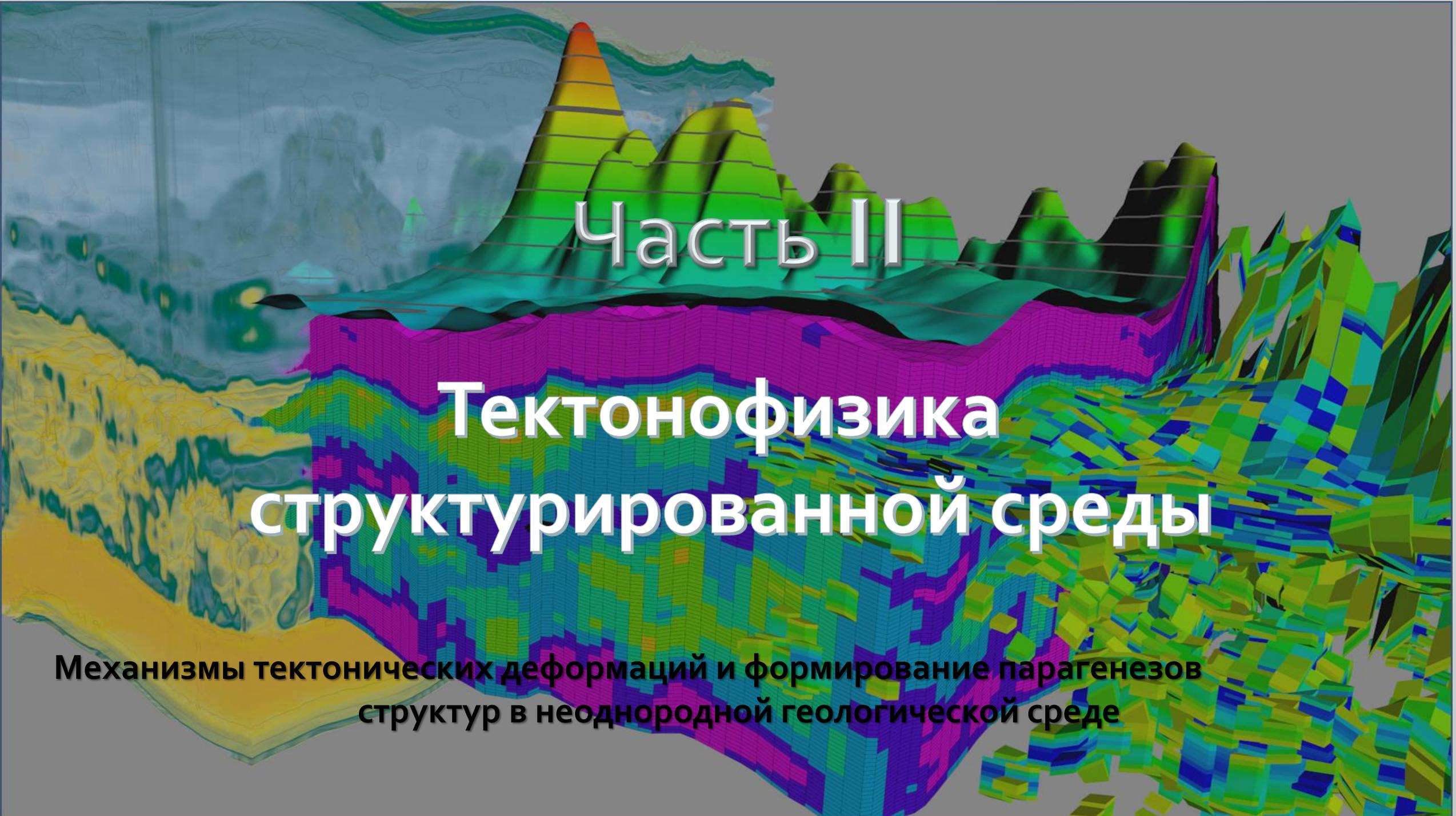




Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Тектонофизика

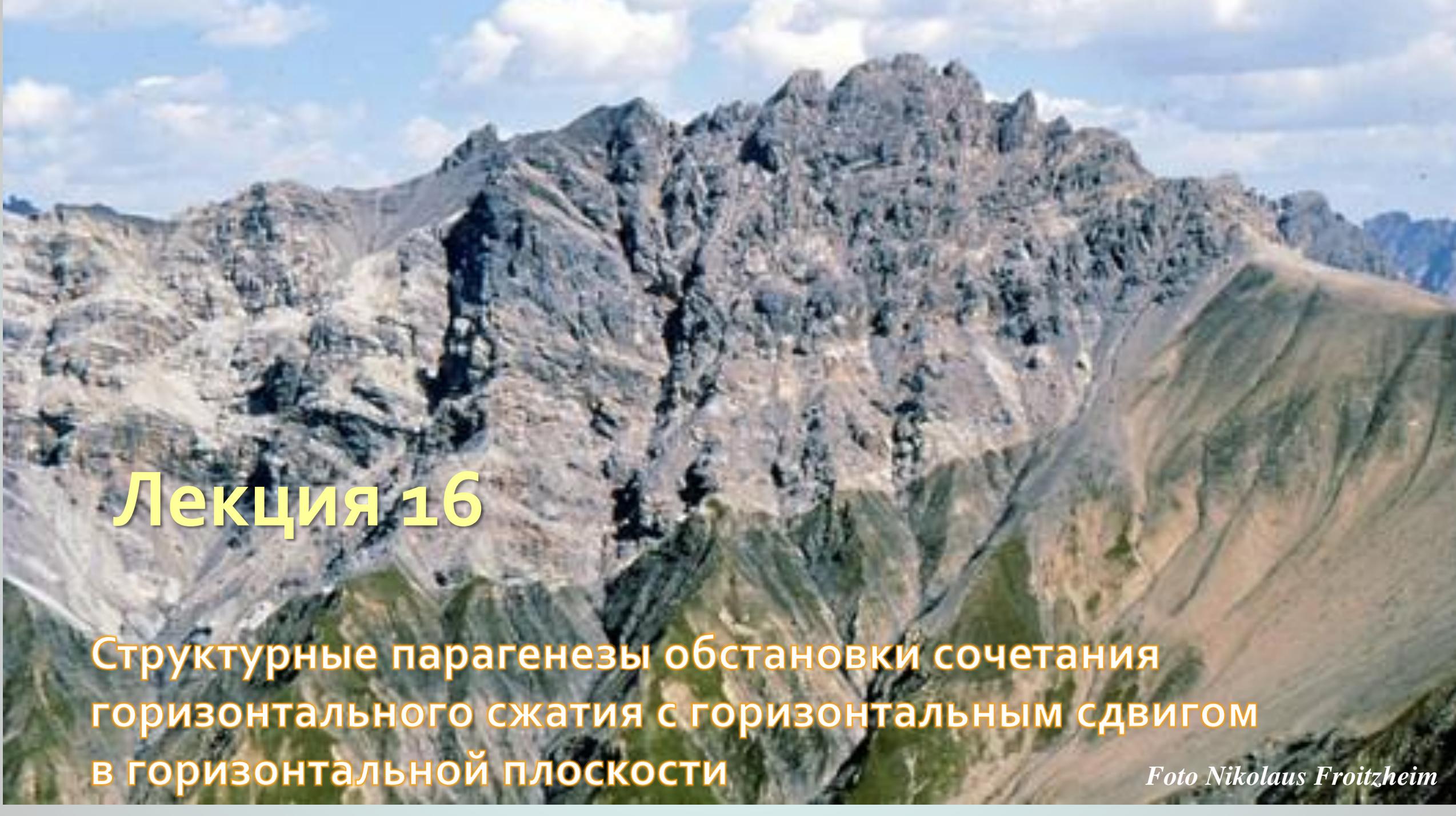
Курс лекций вед. научн. сотр., канд. геол.-минер. наук
Н.С. Фроловой



Часть II

Тектонофизика структурированной среды

Механизмы тектонических деформаций и формирование парагенезов структур в неоднородной геологической среде



Лекция 16

Структурные парагенезы обстановки сочетания
горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом
в горизонтальной плоскости

Foto Nikolaus Froitzheim

СТРУКТУРНЫЙ ПАРАГЕНЕЗ, ХАРАКТЕРНЫЙ ДЛЯ ОБСТАНОВКИ СОЧЕТАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЖАТИЯ И ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СДВИГА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ В СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЯХ:

Наклонные асимметричные складки и сопровождающие их взбросы или надвиги (последние формируются в концеэтапа складкообразования)

Причины асимметрии складок – наложение на горизонтальное сжатие горизонтального скашивания, которое возрастает с течением времени.

Причины формирования соскладчатых взбросов и надвигов – переход от стадии изгиба к стадии общего сплющивания, сопровождающегося изменением относительной ориентировки осей деформации. В этой ситуации энергетически выгоднее осуществление деформации путем перемещения по разрывам.

Основной тип разрывов – взбросы и надвиги. Они формируются преимущественно двумя путями:

а) развиваются на подвернутых крыльях асимметричных складок; б) наследуют ослабленные зоны осевых швов

Структурный уровень деформации: уровень слоистых толщ и блоков

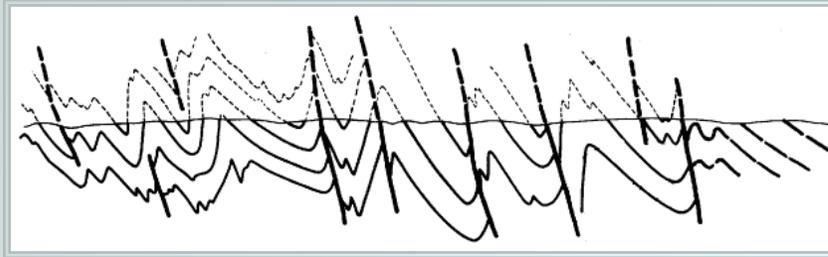
Последовательность формирования: складки - надвиги.

Время формирования: конец этапа складкообразования

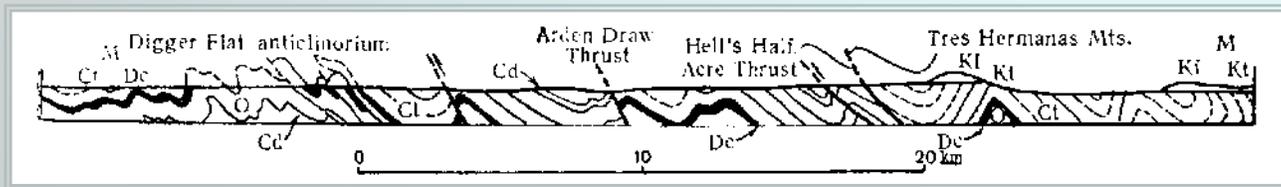
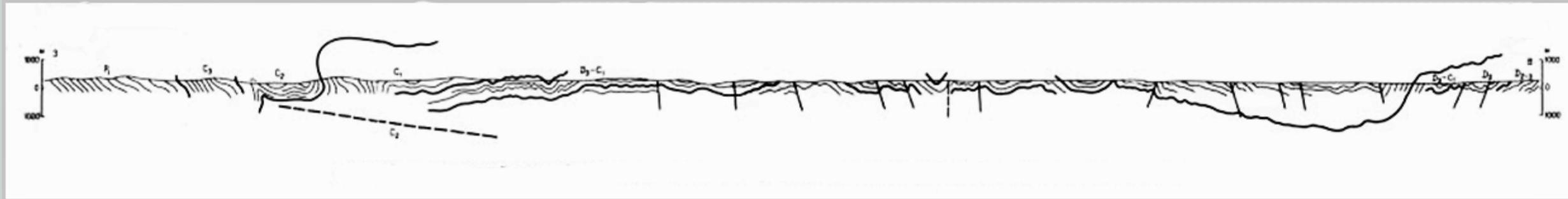
структурный
парагенез
складки-надвиги

Примеры складчатых сооружений

Складки асимметричные, наклонные, осложненные взбросами и надвигами



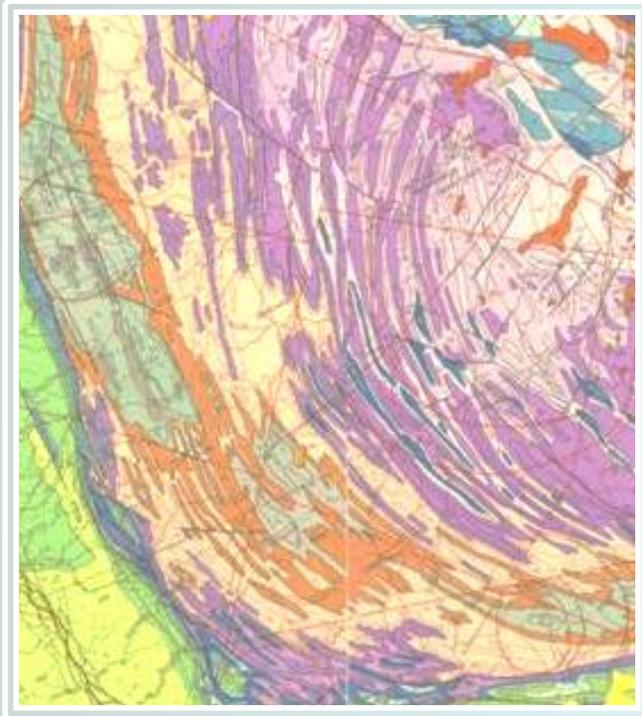
Асимметричные складки в Зилаирском синклинии Южного Урала (по В.В. Эзу)



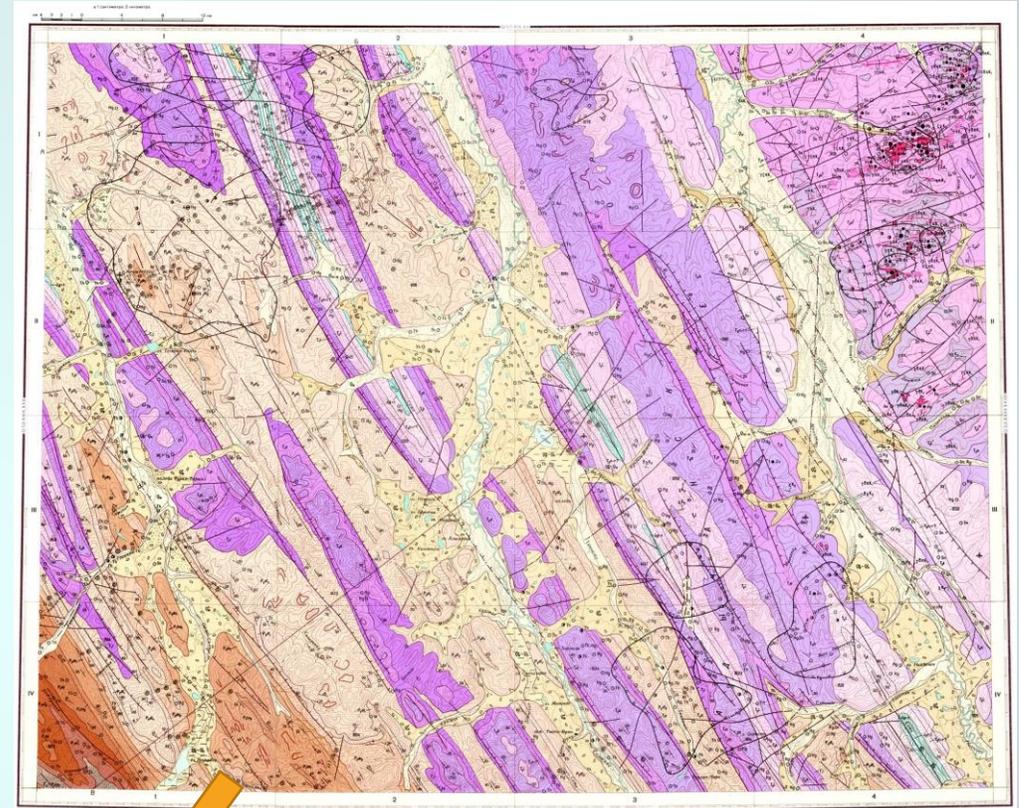
Геологический разрез через Зилаирский Синклиний (по Сенченко, 1976)

Геологический разрез через Марафонское поднятие (США)
(Belousov, 1968)

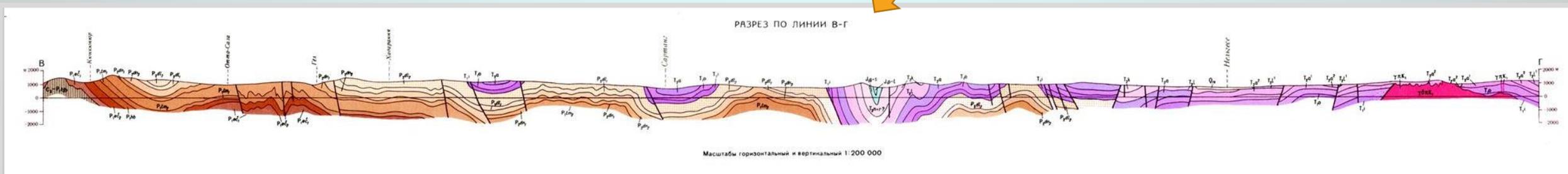
Еще пример



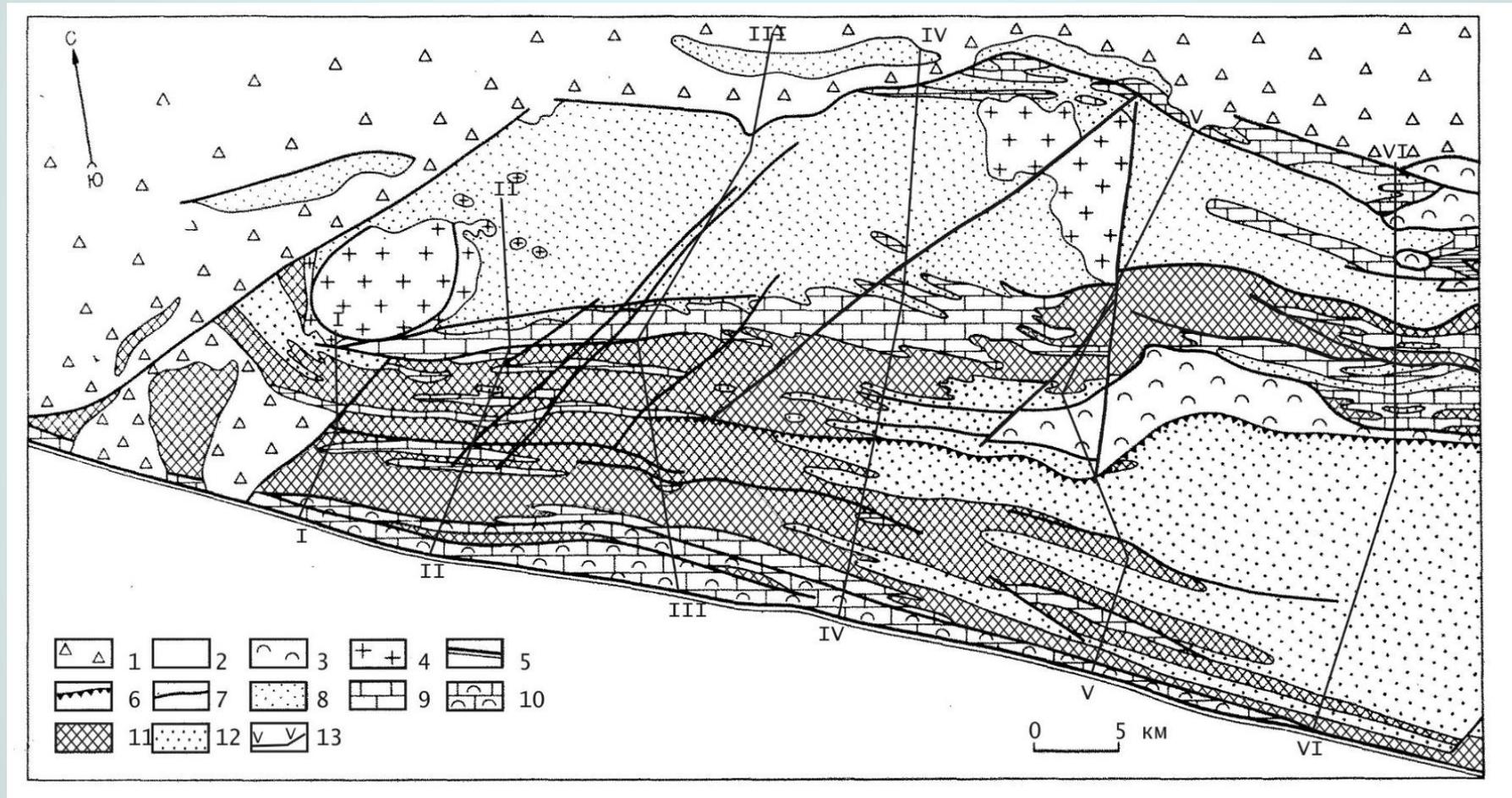
Верхоянский хребет. Фрагмент
Геологической карты, м-б 1:2 500 000.



Геологическая карта
Q-53-XXV,XXVI, м-б 1:200 000,



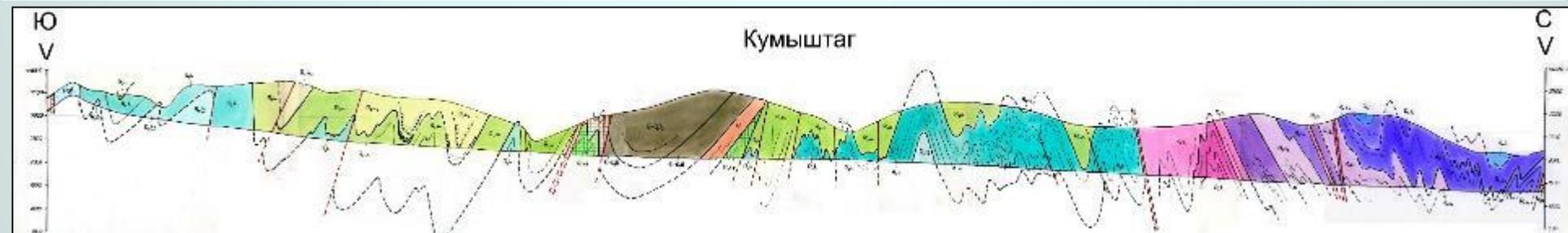
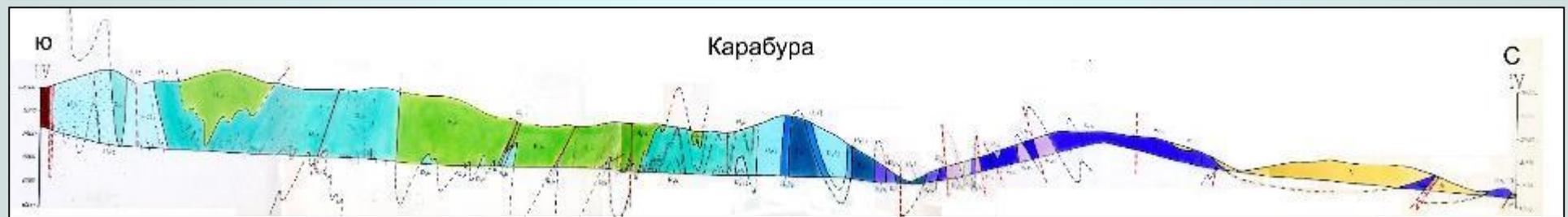
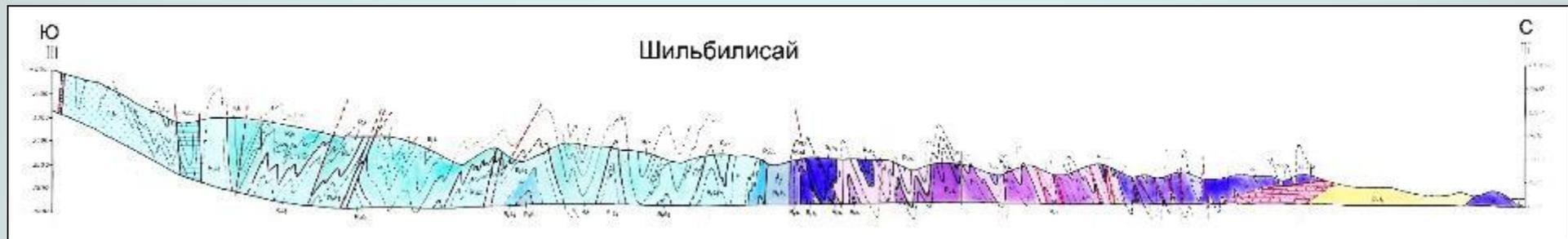
Геологическая карта Северной части Таласского хребта (Северный Тянь-Шань)



Тектонотипы лиейной складчатости: Таласский хребет
Северного Тянь-Шаня, Северный Кавказ

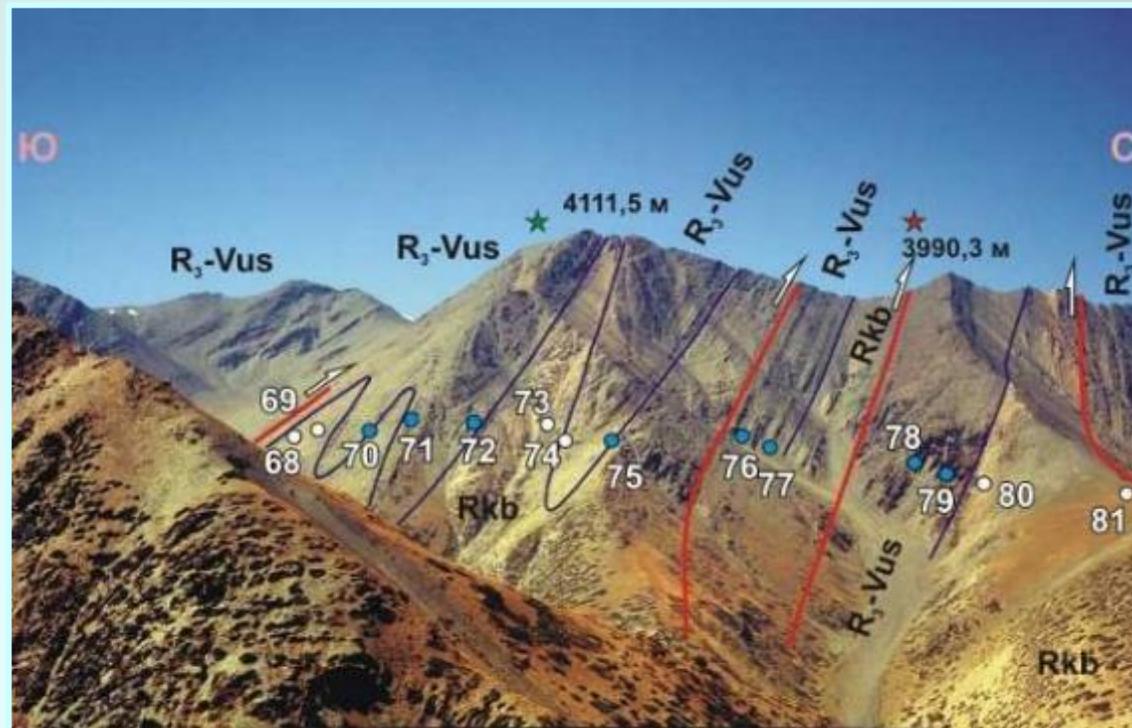
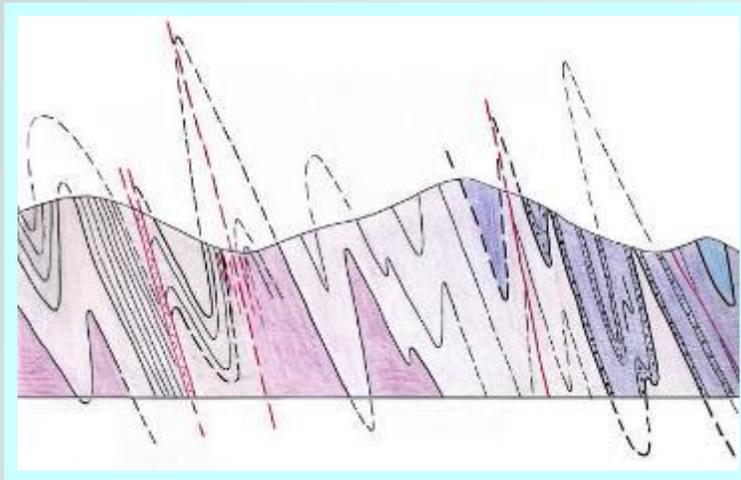
(Гончаров, Малюжинец, Фролова, 1988)

Геологические разрезы через складчатое сооружение Северного склона Таласского хребта

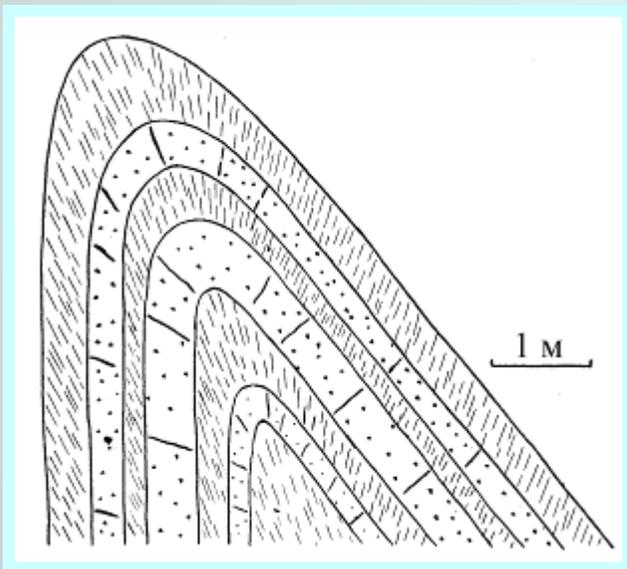


Форма складок и наклон осевых поверхностей постепенно изменяются
(Гончаров, Малюжинец, Фролова, 1988)

Примеры складок



(Войтенко, 2008)



(Гончаров, Малюжинец, Фролова, 1988)



ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ

- Линейность в плане
- Субпараллельная ориентировка шарниров в плане
- Слабый наклон шарниров
- Шарниры субпараллельны
- Постепенное изменение вергенции
- Не слишком резкая дисгармония, характер складок изменяется больше по вертикали
- Имеет место слабая и средняя асимметрия
- Взбросы и надвиги, тесно связаны с развитием складок и формируются в конце этапа складкообразования
- «Правильные» набегающие складки
- Зеркло складчатости имеет плавные очертания
- Складки равномерно заполняют пространство
- Зоны срыва встречаются не часто
- Складки находятся в парагенезе с определенными малыми структурными формами

- Структурный парагенез сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом в горизонтальной плоскости
- Роль горизонтального сдвига незначительна

- Линейная складчатость формируется в результате горизонтального сжатия в сочетании с горизонтальным сдвигом в горизонтальной плоскости. Представления о причинах этого сжатия были и есть разные, а господствующие модели меняются с течением времени
- В пределах складчатых зон этого типа всегда имеют место взбросы и надвиги. Иногда встречаются и покровы, но они не определяют характер этой складчатости

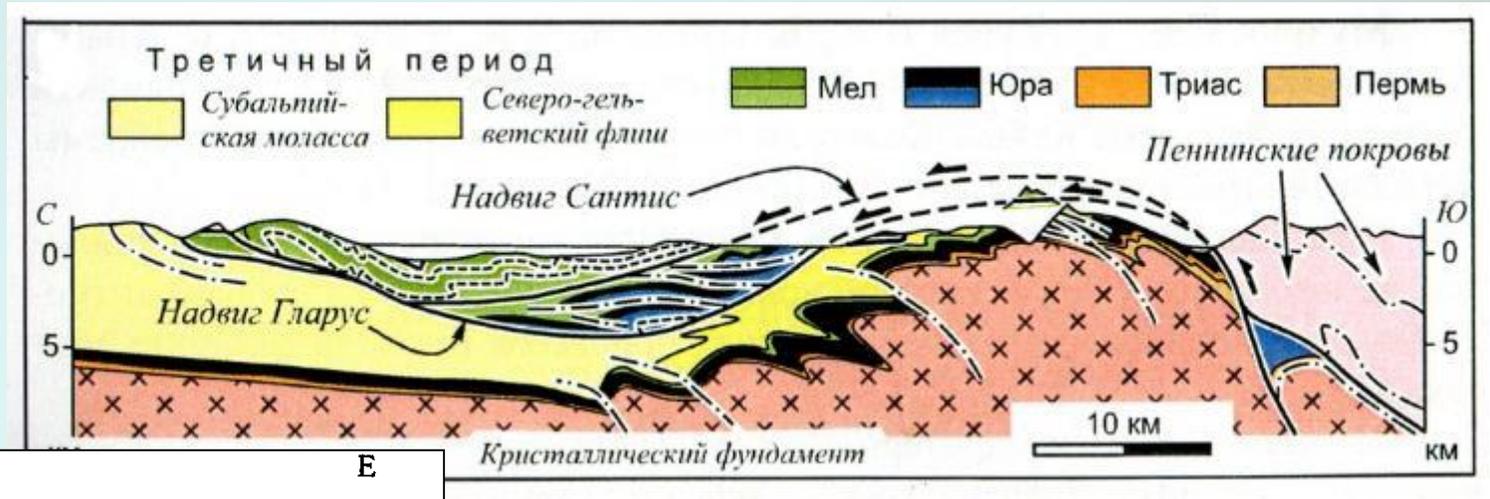
Существует и другой распространенный тип складчатости, в котором важную роль играют покровы. Тектонотип - Альпы

- Структурный парагенез сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом в горизонтальной плоскости

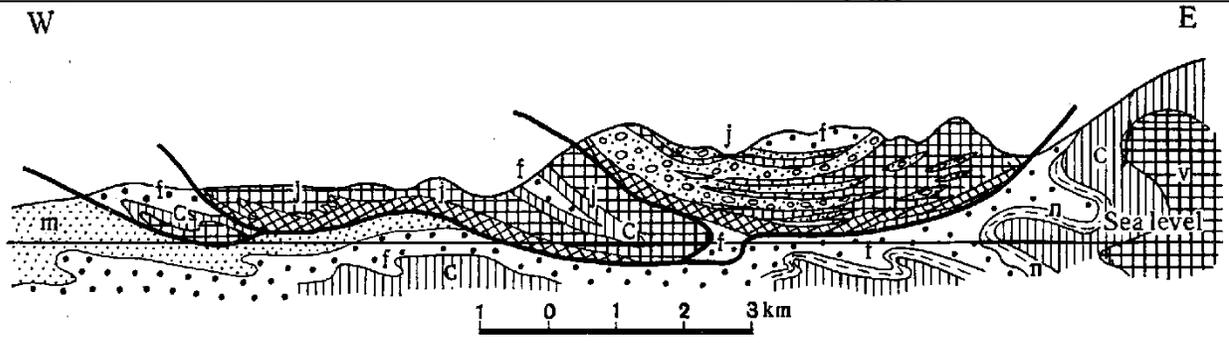
СКЛАДЧАТОСТЬ АЛЬПИЙСКОГО ТИПА



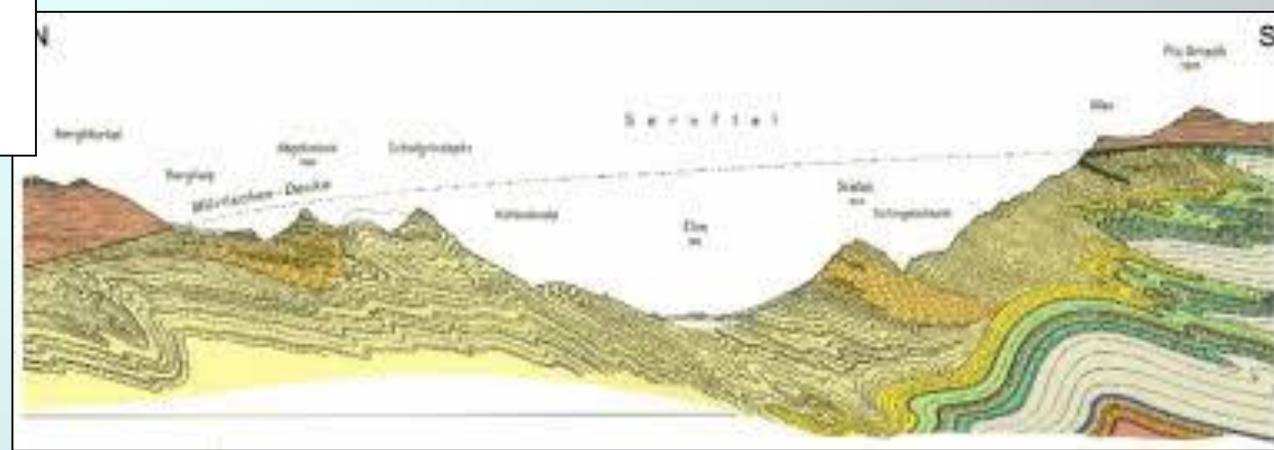
Пеннинские и Гельветские покровы Альп



(Pfiffner, 2005)

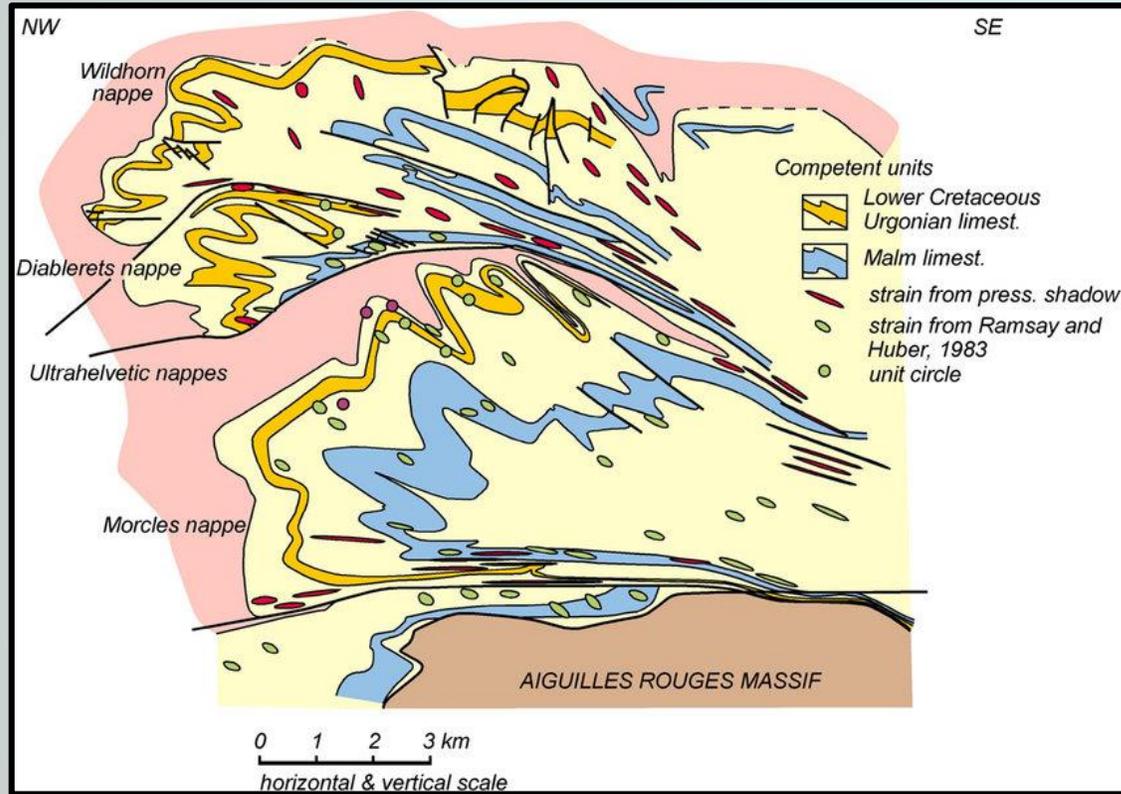


Схематические разрезы Альп Гларуса.
(Руттен, 1972)

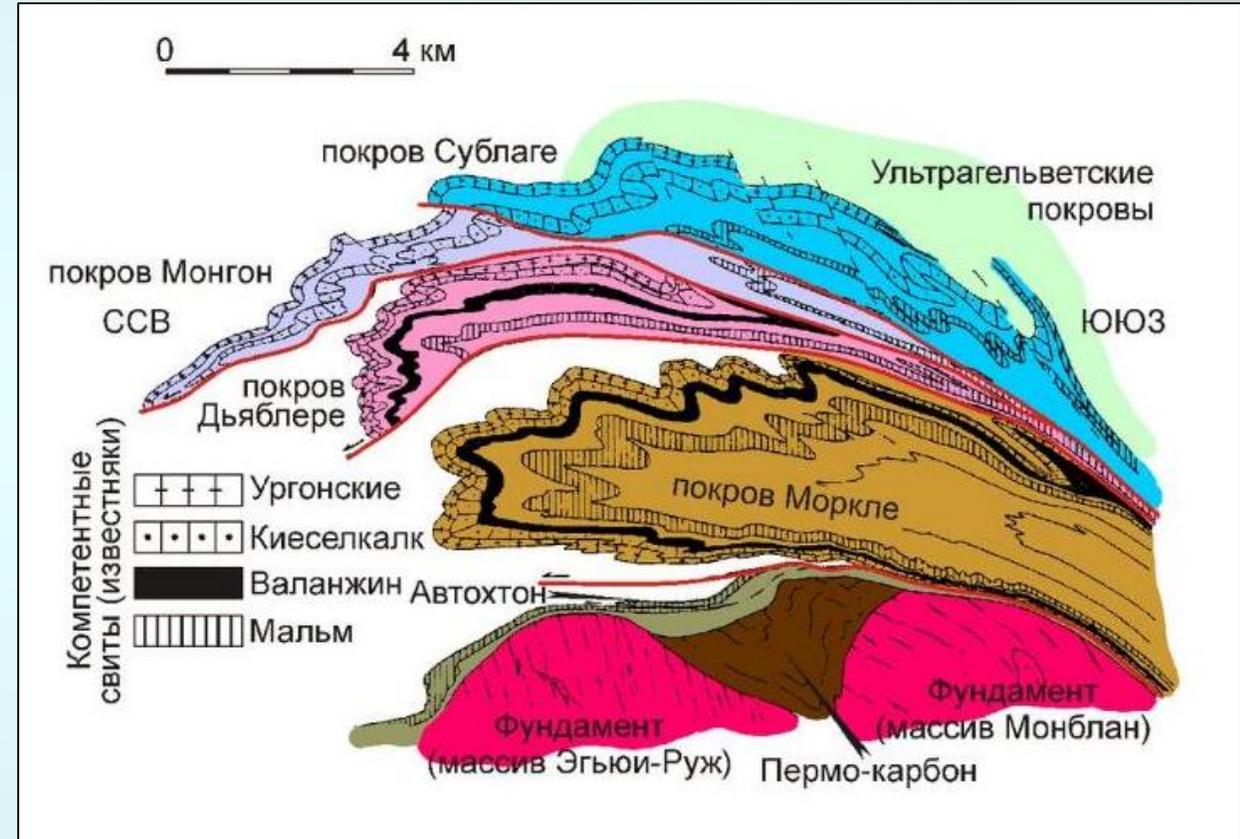


Надвиг Гларус

Схематические разрезы через Гельветские покровы



(no Casey and Dietrich, 1997)



(no Гейму, 1919)

Это так называемые «покровы-складки», по Терье

Гельветские и ультрагельветские покровы в Альпах

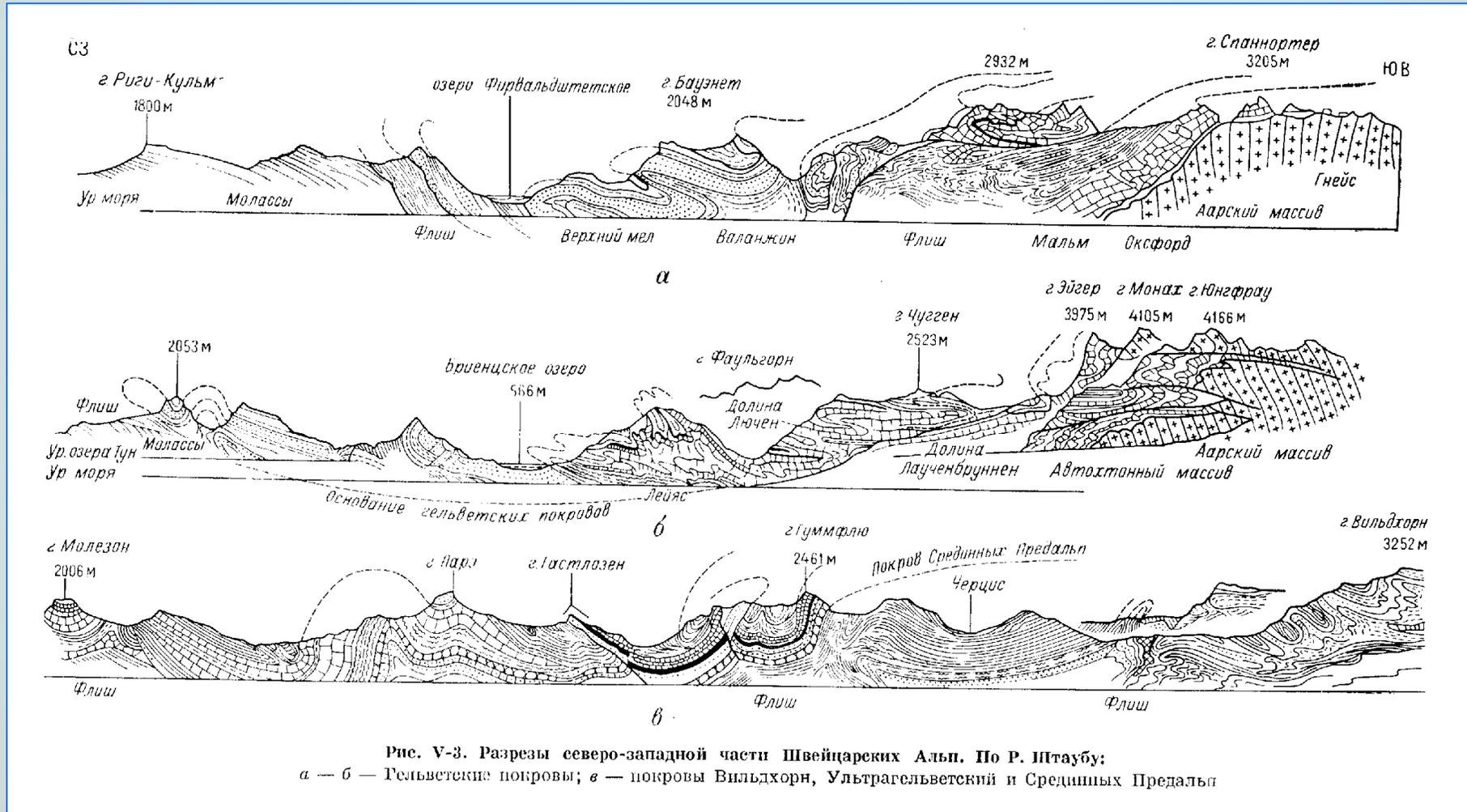
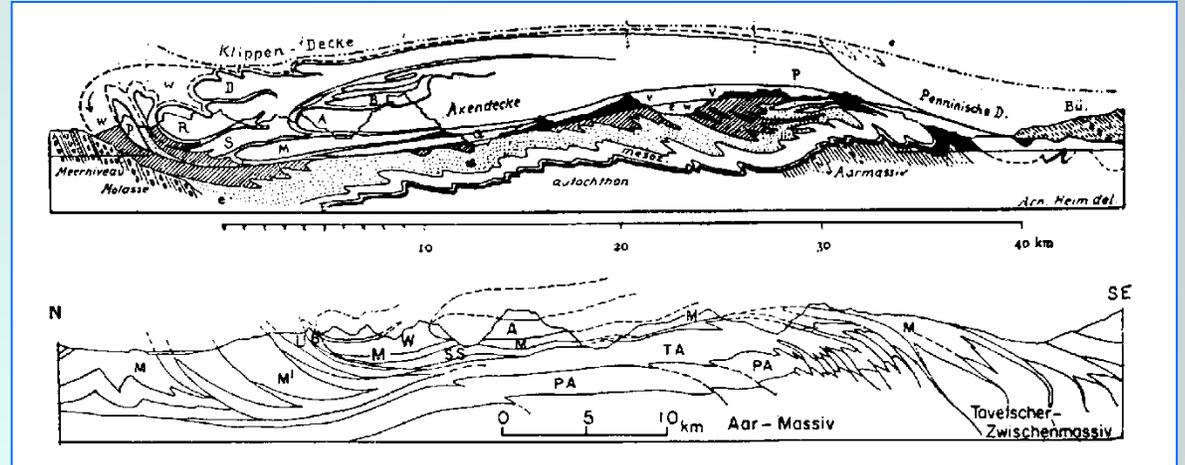


Рис. V-3. Разрезы северо-западной части Швейцарских Альп. По Р. Штаубу:
 а — б — Гельветские покровы; в — покровы Вильдхорн, Ультрагельветский и Срединных Предальп

Альпы. Надви́ги и складки



Надвиг во внешней зоне Савойских Альп (Белоусов, 1968)



Складки в Гельветских покровах, Швейцария

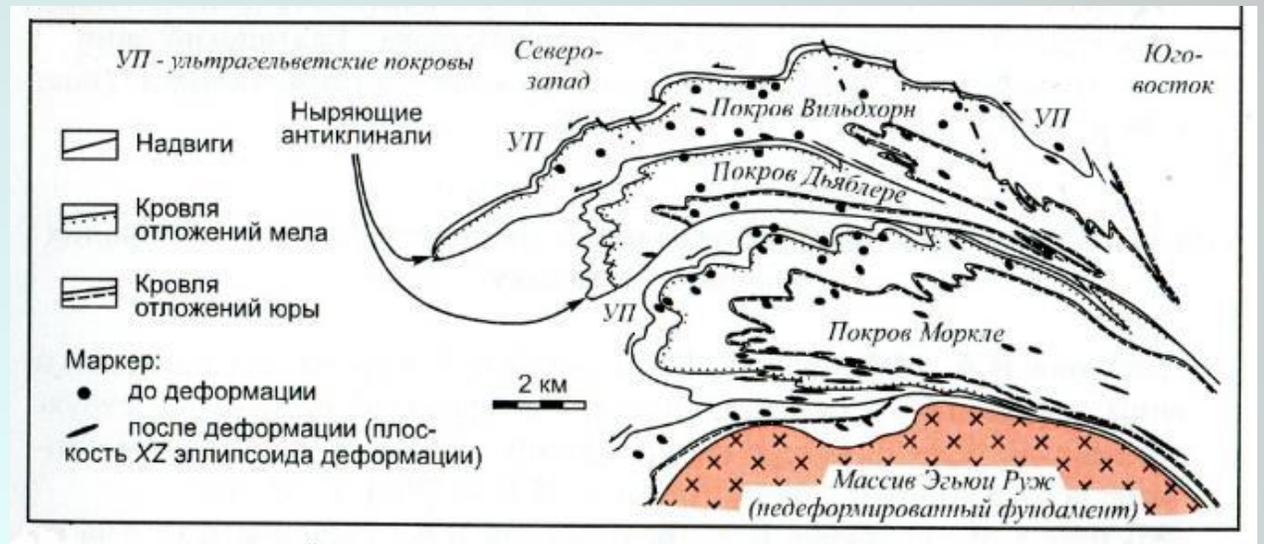


Лежачая складка в Швейцарских Альпах

<https://www.easternct.edu/cunninghamw/files/rise-hp-swiss-foldings>

<https://www.sciencephoto.com/media/1120012/view/sichelchamm-mountain-switzerland>

Гельветские покровы



- Образование Гельветских покровов долгое время объяснялось гравитационным оползанием слабо консолидированных толщ со склона растущего Альпийского коллизионного орогена (Белостоцкий, 1977). Однако в 1980-х гг. для этих покровов были получены данные о геометрии складок, значительном увеличении деформации от верха покрова к его подошве и ориентировке эллипсоида конечной деформации (Ramsay, 1981; Dietrich, Casey, 1989). В ансамбле гельветских покровов был выявлен температурный градиент: пластические деформации в подошве ансамбля протекали при температуре 380°C , а в верхней части ансамбля -180°C (Dietrich, Casey, 1989; Herwegh, Pfiffner, 2005).
- Все это привело к тому, что в настоящее время гельветские покровы рассматриваются как компоненты крупной и сложнопостроенной шарьяжной пластины (Dietrich, Casey, 1989; Herwegh, Pfiffner, 2005). Эта пластина ограничена надвигами Гларус и Сантис и сложена породами, выдавленными из корневой зоны и перемещенными к северу на расстояние первые десятки километров.
- Не стоит сбрасывать со счетов и конвективный механизм формирования этих структур

Пример надвиго-складчатой структуры Динарид



Складчато-покровная структура Динаридов

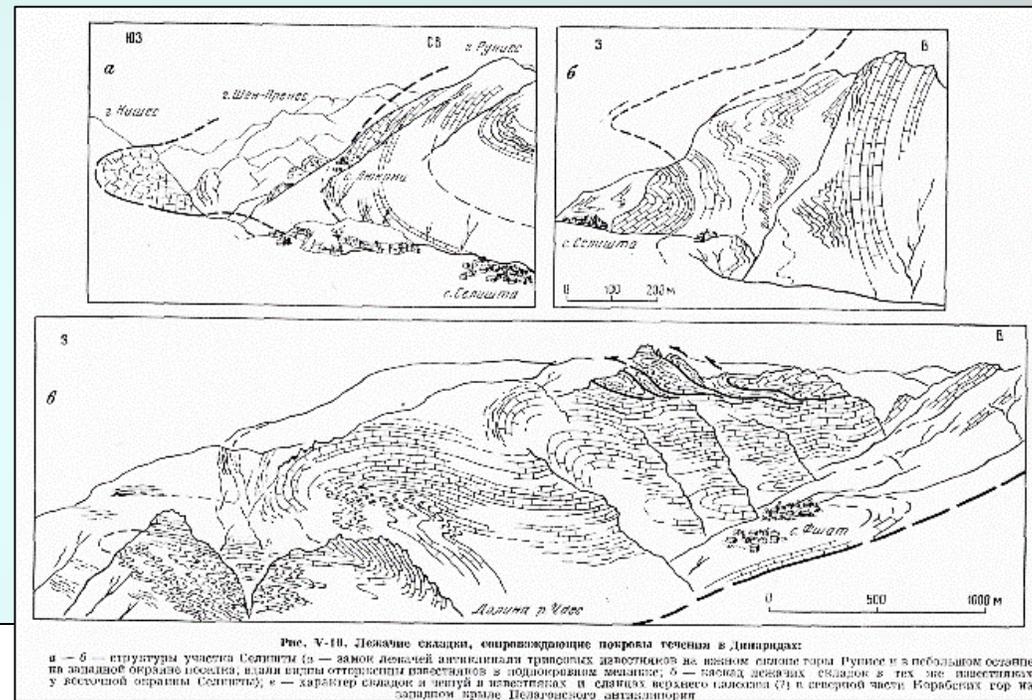
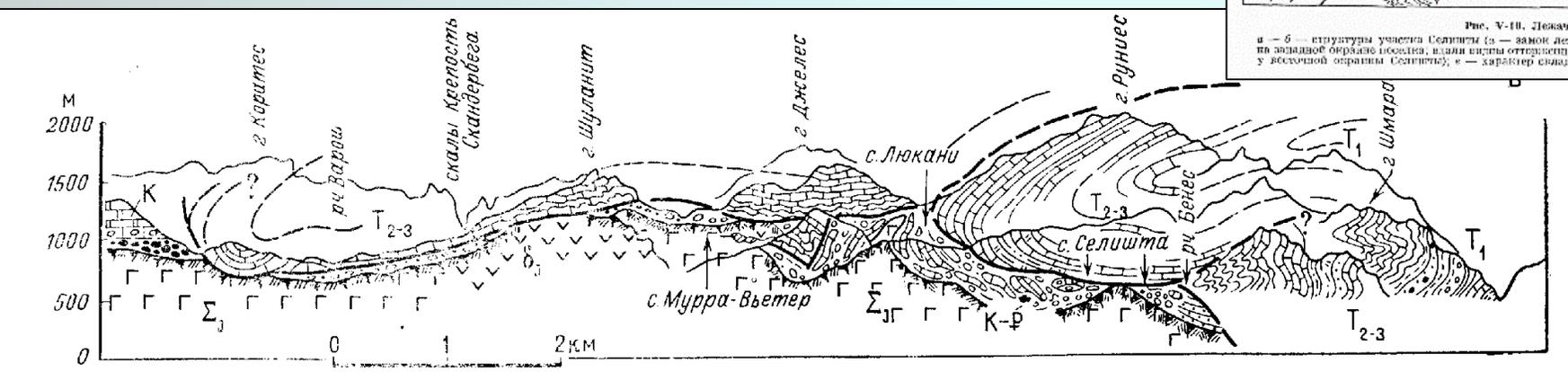


Рис. V-10. Левачие складки, соответствующие поворота течений в Динаридах:
 а — б — структуры участка Селишта (а — закон левачей антиклинали триасовых девонидов на южном склоне горы Рунис и в небольшом осадке на западной окраине поселения, вдали видны отклонения пластов в лодиночном меланче; б — пласид левачих складок в тех же известняках у восточной окраины Селишта); в — характер складок и линий в известняках и сланцах верхнего карбона (?), в северной части Корбаских гор на западном крае Пелопонесского полуострова.

(Белостоцкий, 1977)



Структурно-геологическая схема и обобщенный разрез (по пескольким профилям) района пос. Селишта в Динаридах.

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ СКЛАДЧАТОСТИ АЛЬПИЙСКОГО ТИПА

- Структурный парагенез сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом в горизонтальной плоскости
- Роль горизонтального сдвига велика

- Имеют место покровы-складки.
- Складки преимущественно лежачие
- Складки крупные (могут быть осложнены мелкими)
- Большая амплитуда перемещения по надвигам (покровам, шарьяжам)
- Надвигание одних складчатых комплексов на другие

Обстановка
сочетания
горизонтального
сжатия с
горизонтальным
скашиванием

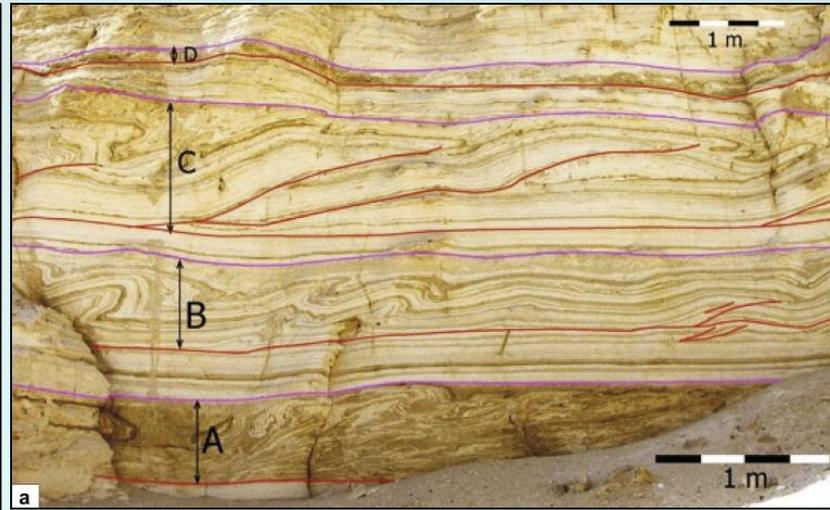
**СТРУКТУРНЫЕ ПАРАГЕНЕЗЫ СКЛАДЧАТОСТИ
ПОДВОДНОГО ОПОЛЗАНИЯ (SLUMP FOLDS)**







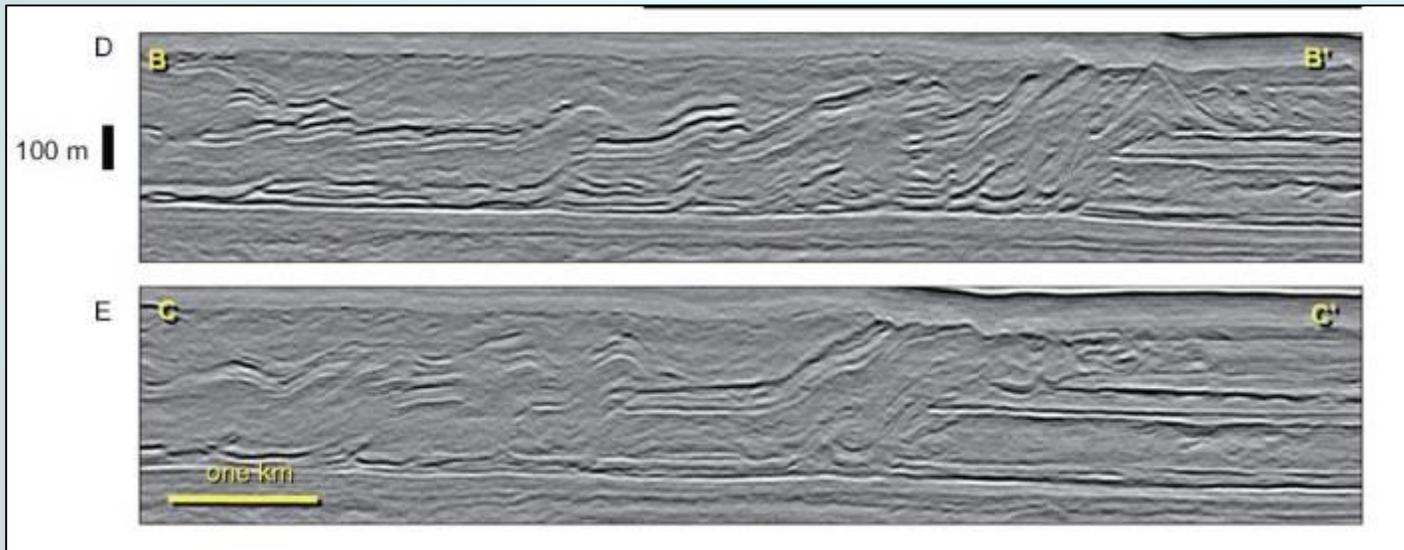
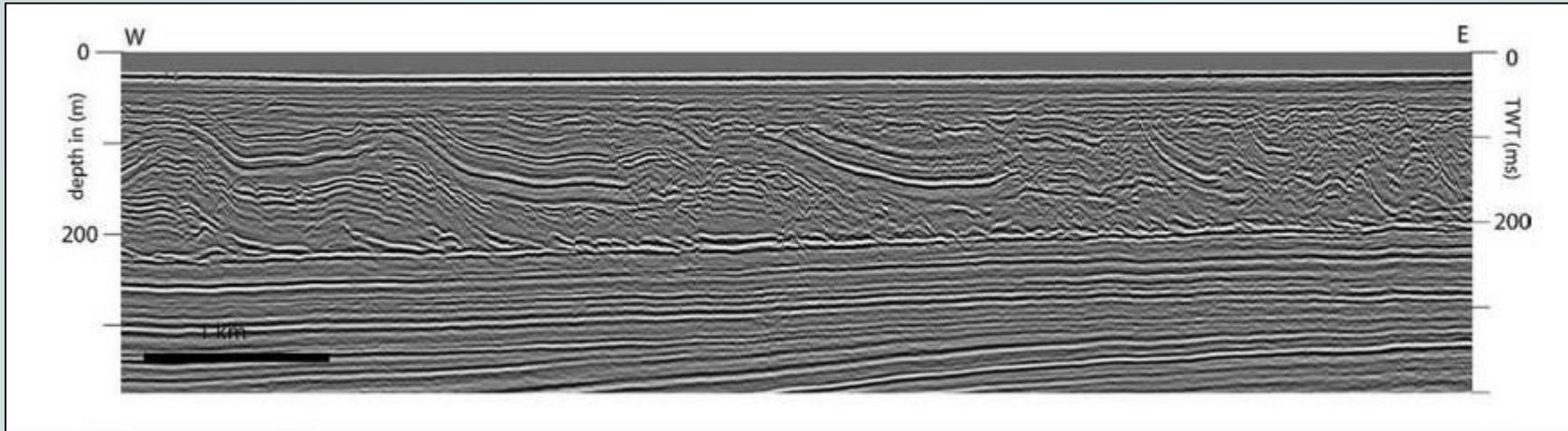
**Верхний мел, Дагестан
Фото Ю.О. Гаврилова**



Характерные черты рассматриваемых складчатых комплексов:

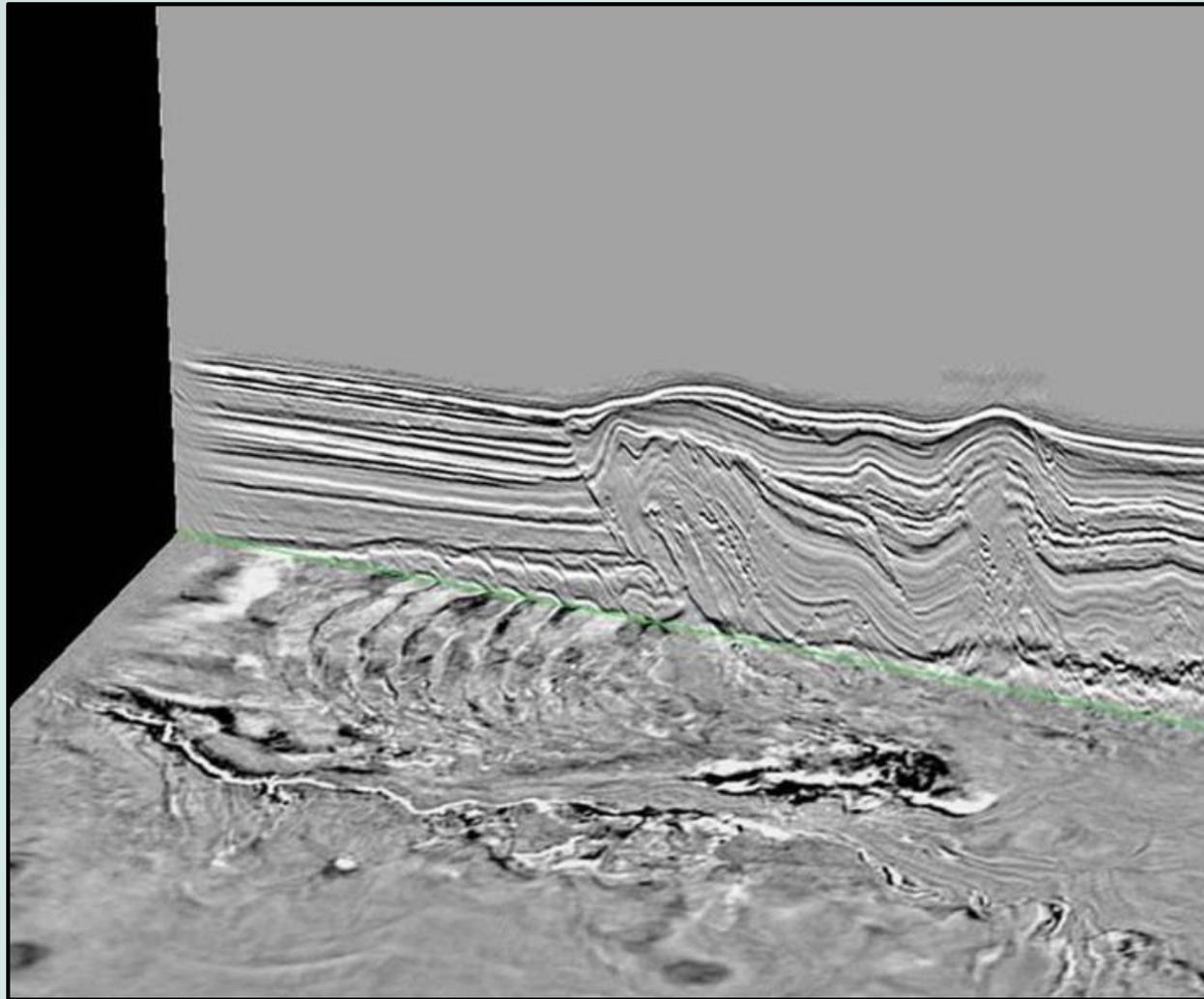
- Располагаются между ненарушенными пачками
- Складчатые комплексы подстилаются горизонтом срыва
- Складки наклонные, опрокинутые, лежащие
- Складки часто осложнены надвигами на подвернутых крыльях
- Складчатая структура дисгармонична, иногда – резко дисгармонична

Крупные структуры, обнаруженные с помощью 3D сейсморазведки



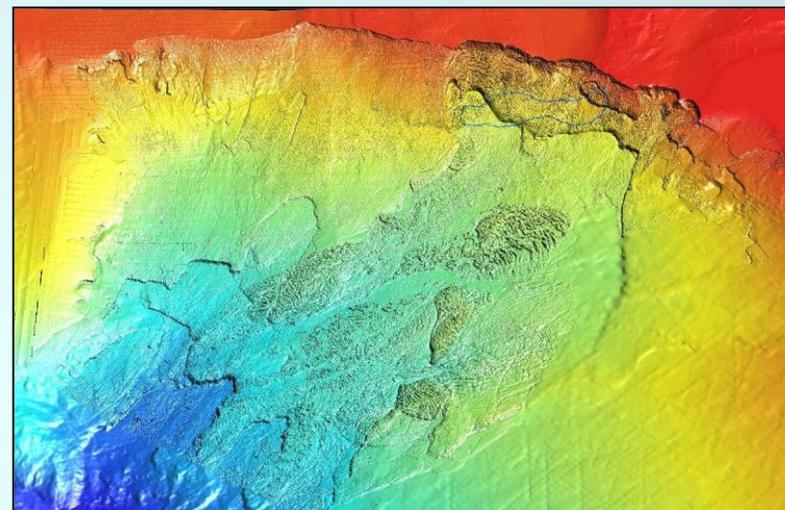
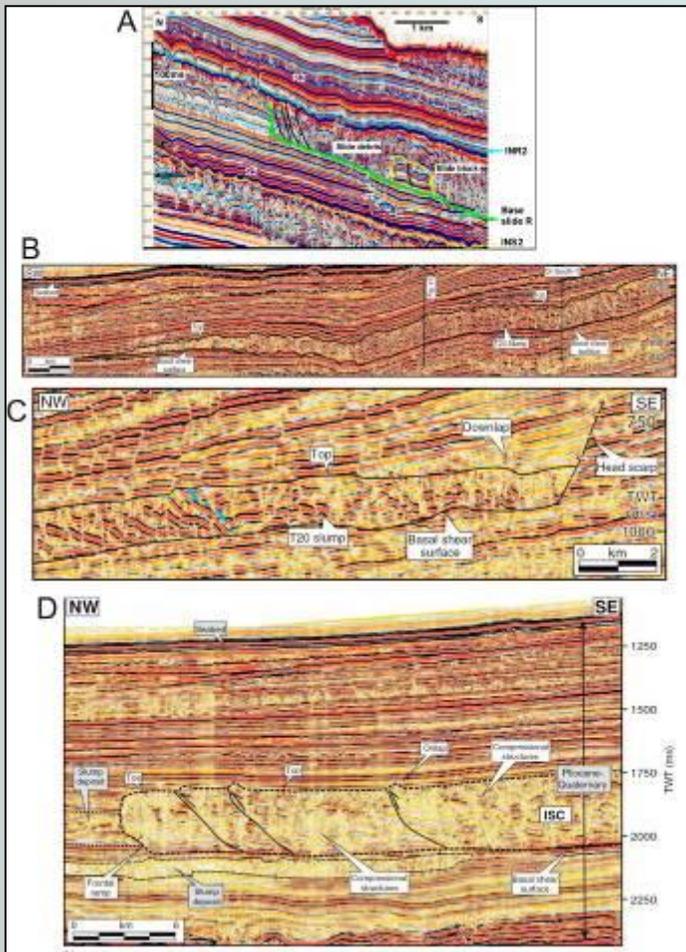
(Anderson, 2005)

Система складок и надвигов на склоне с подошвенным детачментом (срывом).
(Posamentier, Walker, 2006).



Система складок и надвигов на склоне, образованная отложениями транспорта масс, с подошвенным детачментом (срывом). Сейсмический слайс и разрез к нему. Хорошо видна геометрия разрывов (*Posamentier, Walker, 2006*).

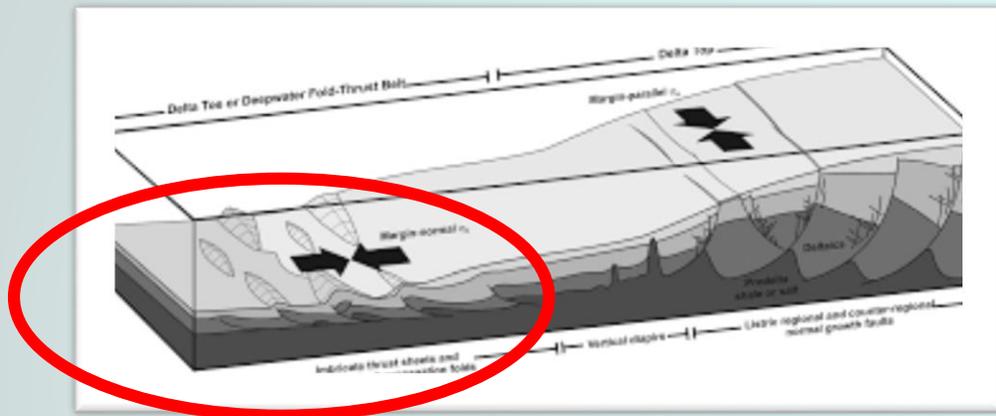
Крупные оползневые потоки с фрагментами складчато-надвигового строения обнаружены на пассивных окраинах, в дельтах крупных рек и других местах



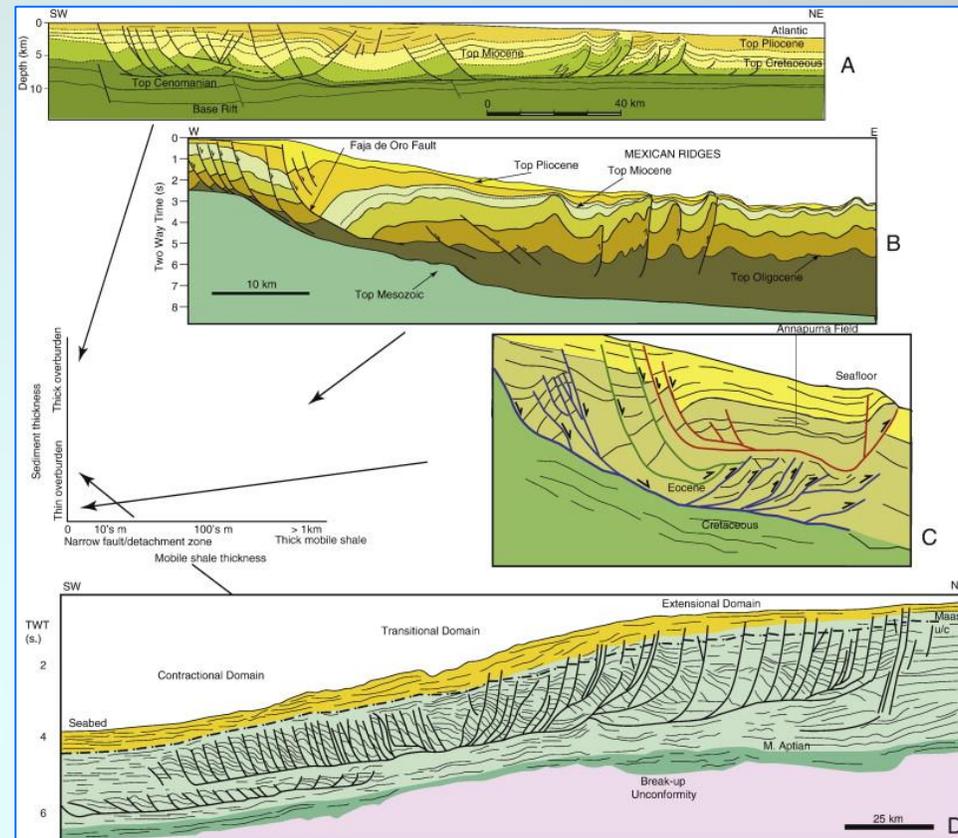
Топография дна с крупным оползневым потоком Сторегга на пассивной континентальной окраине Норвегии. Топография склона (*Kvalstad et al., 2005*)

А - фрагмент профиля для района оползневых потоков Сторегга на континентальном склоне Норвегии. Это верхняя часть склона, для которого характерно оползание и сопутствующее растяжение (*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.

Крупные слампы располагаются на пассивных окраинах – чаще всего в подводных дельтах

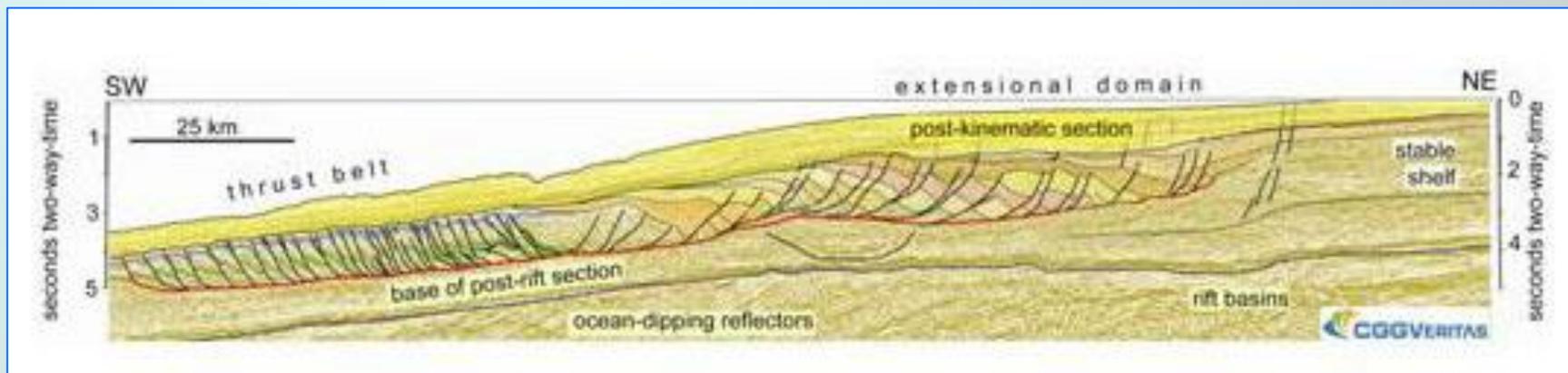


Модель Fold-Thrust Belt в дельте реки. Австралия (King, Baked, 2010)



(Morley et al., 2011)

Обстановка горизонтального сжатия со скашиванием имеет место во фронтальной части сламповой пластины



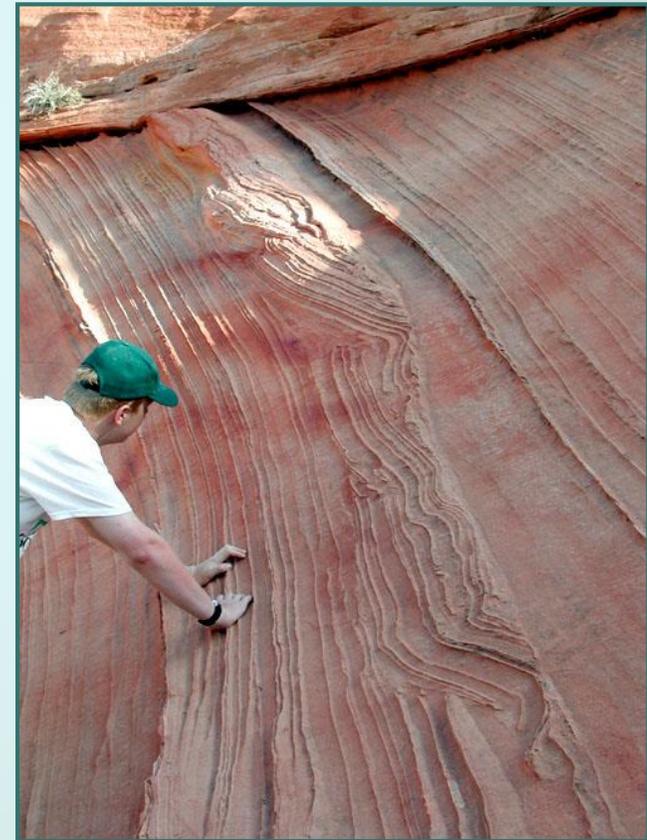
Новая Каледония (Collot et al., 2017)

Мелкие системы рассматриваемых асимметричных складок и надвигов формируются на склонах различных осадочных бассейнов и даже на склонах дюн

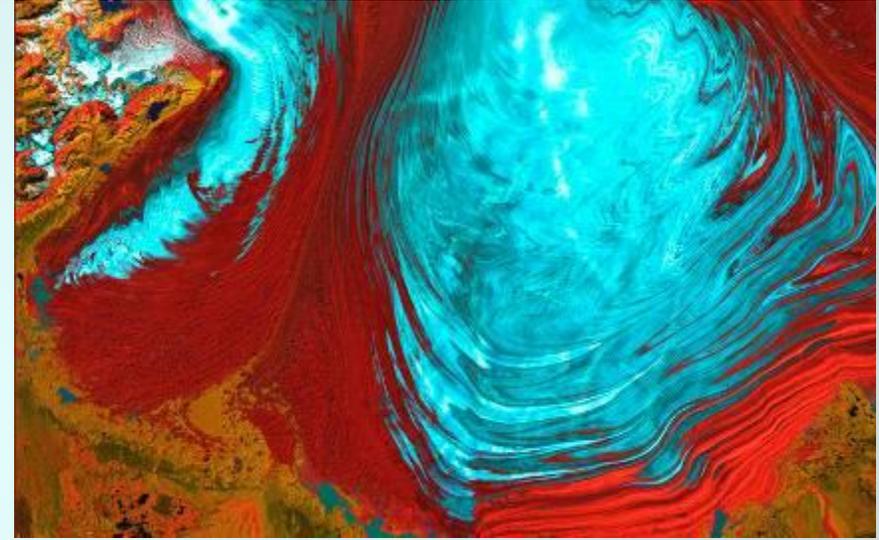


Обильные ливни на песчаных дюнах могут привести к большим оползням. Северная Мексика. *Foto N.Lancaster*

Слампы в отложениях нижней юры (отложения субэриальных песчаных дюн). Плато Колорадо

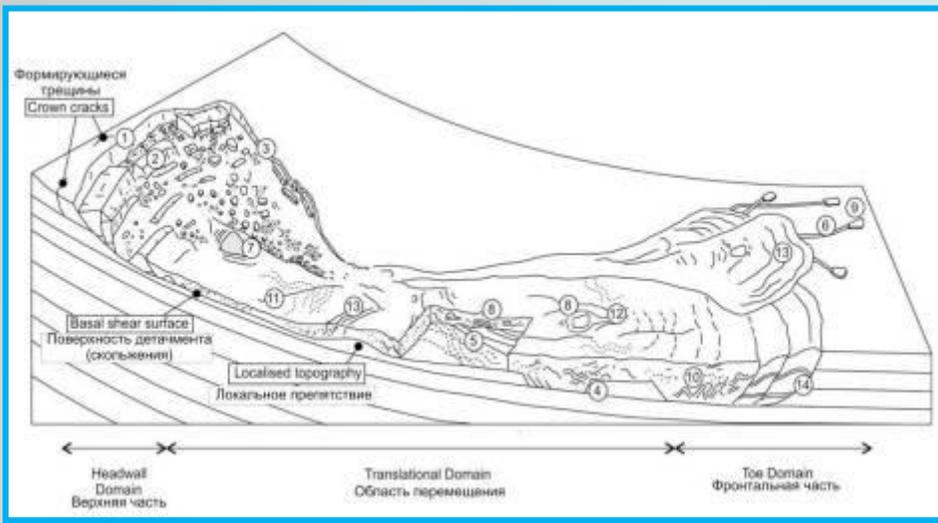


Все приведенные примеры представляют собой оползни (slumps) на склонах, преимущественно подводных. Они аналогичны оползням на суше (только там нет слоистости). Можно провести также аналогию со сползающими со склонов гор ледниками



Интернет-ресурс



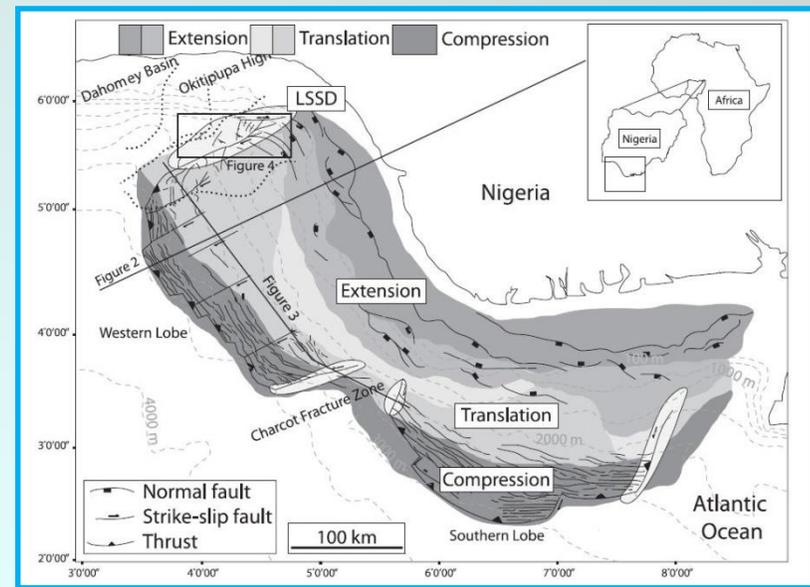


Модель деформаций в отложениях транспорта масс (no Bull et al., 2009 из Никишин и др., 2012)

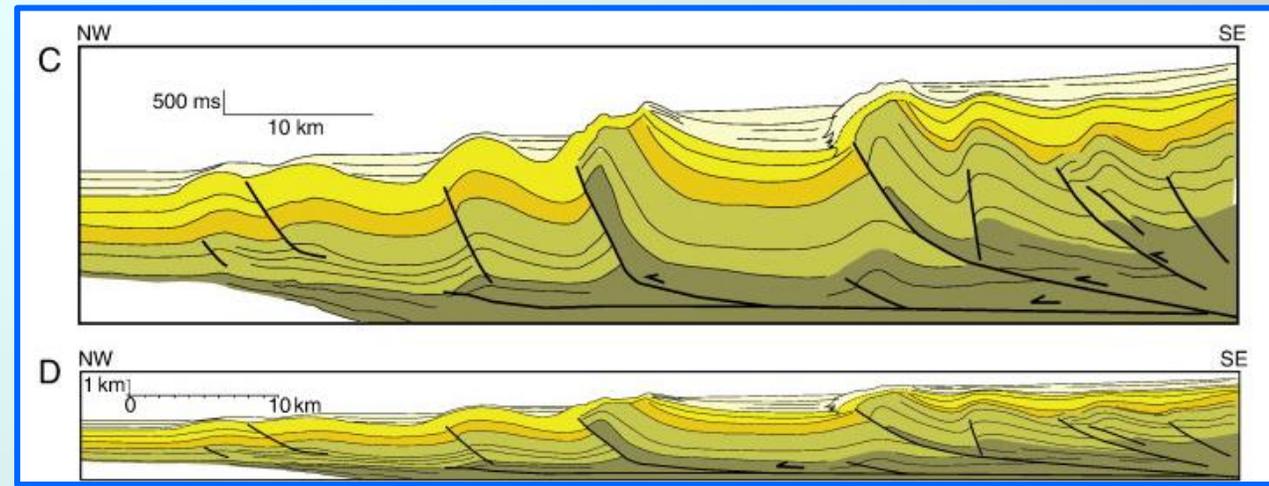


Подводно-оползневые складки, сформировавшиеся на небольшой глубине. Мертвое море (Alsop, Marco, 2011)

Укорочение достигается за счет наличия упора, а скашивание за счет трения в основании соскальзывающих масс



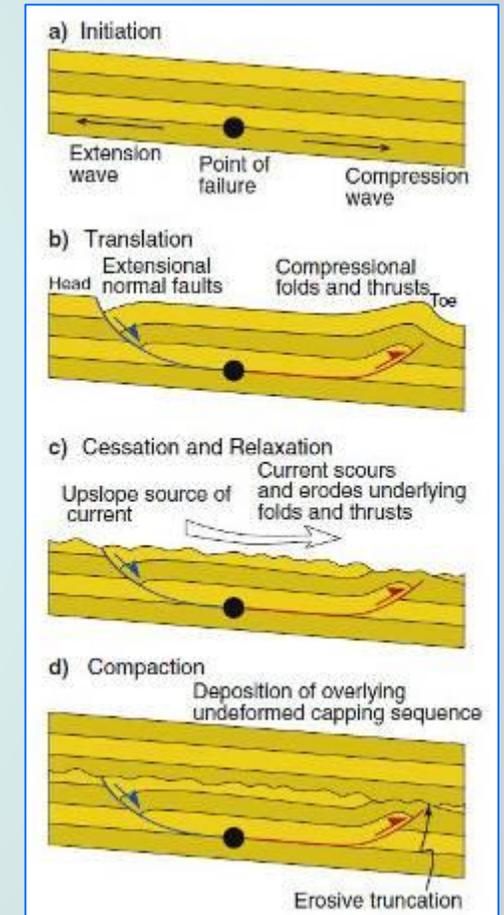
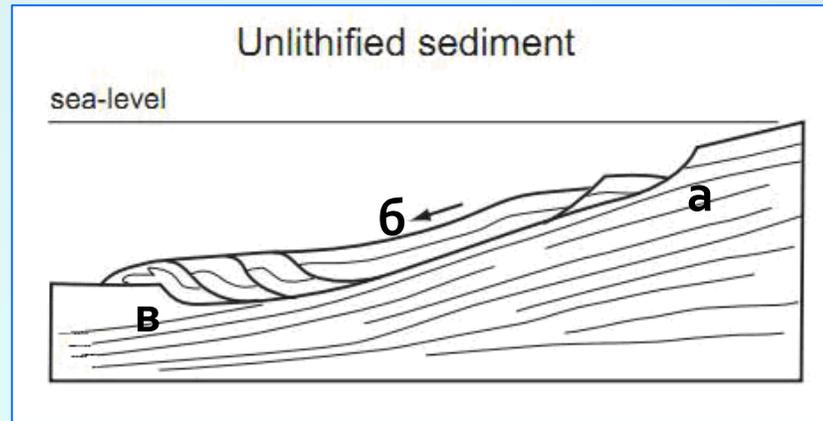
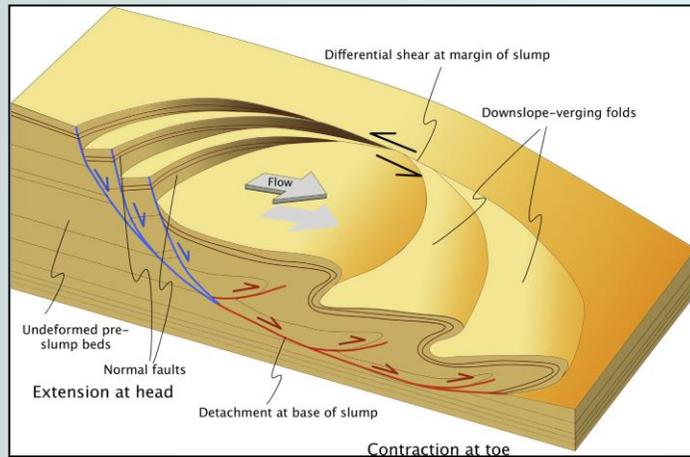
Морская дельта Нигера с выделенными структурными областями (Leduc et al., 2011)



Подводная складчато-надвиговая область (Fold thrust belt) (Morley et al., 2011)

- **Слампинг** – одна из форм перемещения (транспорта) масс, которая происходит, когда связные массы полуконсолидированного материала или слоев горных пород перемещаются на небольшое расстояние вниз по склону. Перемещение характеризуется скольжением вдоль изогнутой или плоской поверхности. Причинами слампинга служат землетрясения, обильное смачивание, подрезание и слишком высокая нагрузка склона.
- Механизм, позволяющий осуществиться сползанию масс по склонам: быстрое накопление осадков. Рост нагрузки. Поровое давление флюидов увеличивается быстрее чем уходит захваченная вода. Избыточно давление флюидов раздвигает частицы пород, обуславливая поведение осадков подобно тиксотропной жидкости. Во флюидном состоянии осадки сохраняют сцепление, препятствующее разрушению их формы
- Осадочные комплексы деформируются во время такого оползания
- Слампинг – только одна из форм транспорта масс на подводных склонах
- Слампингу могут подвергаться очень большие объемы осадков
- Важно выявлять сламповую складчатость в складчатых и складчато-надвиговых областях и отличать ее от собственно «тектонической» складчатости

Итак, мы рассматриваем складчатость, обусловленную силами гравитации, а конкретно, сползание слоистых пачек или толщ со склонов. Это причина формирования складчатости, но нам важна деформационная обстановка и механизм ее формирования

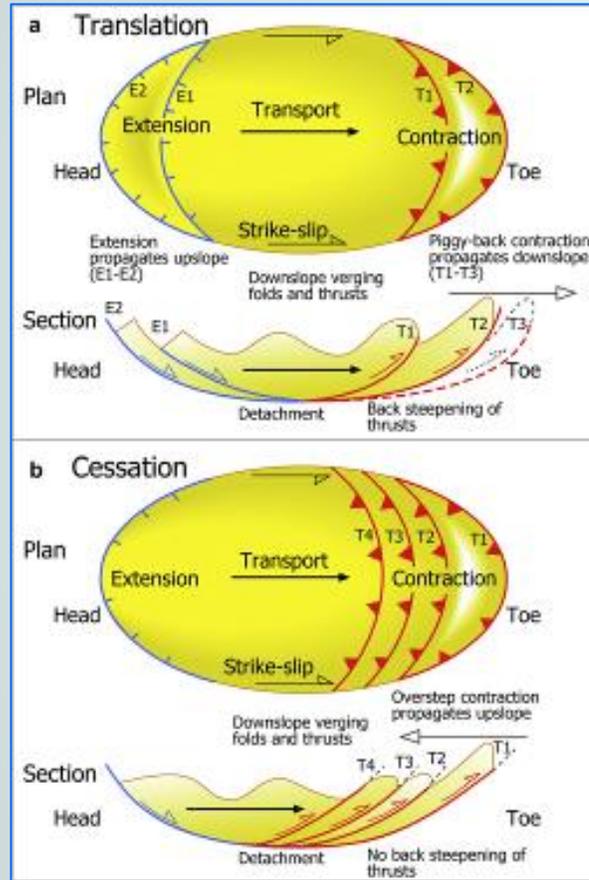


Сламп в поперечном разрезе. Схема.

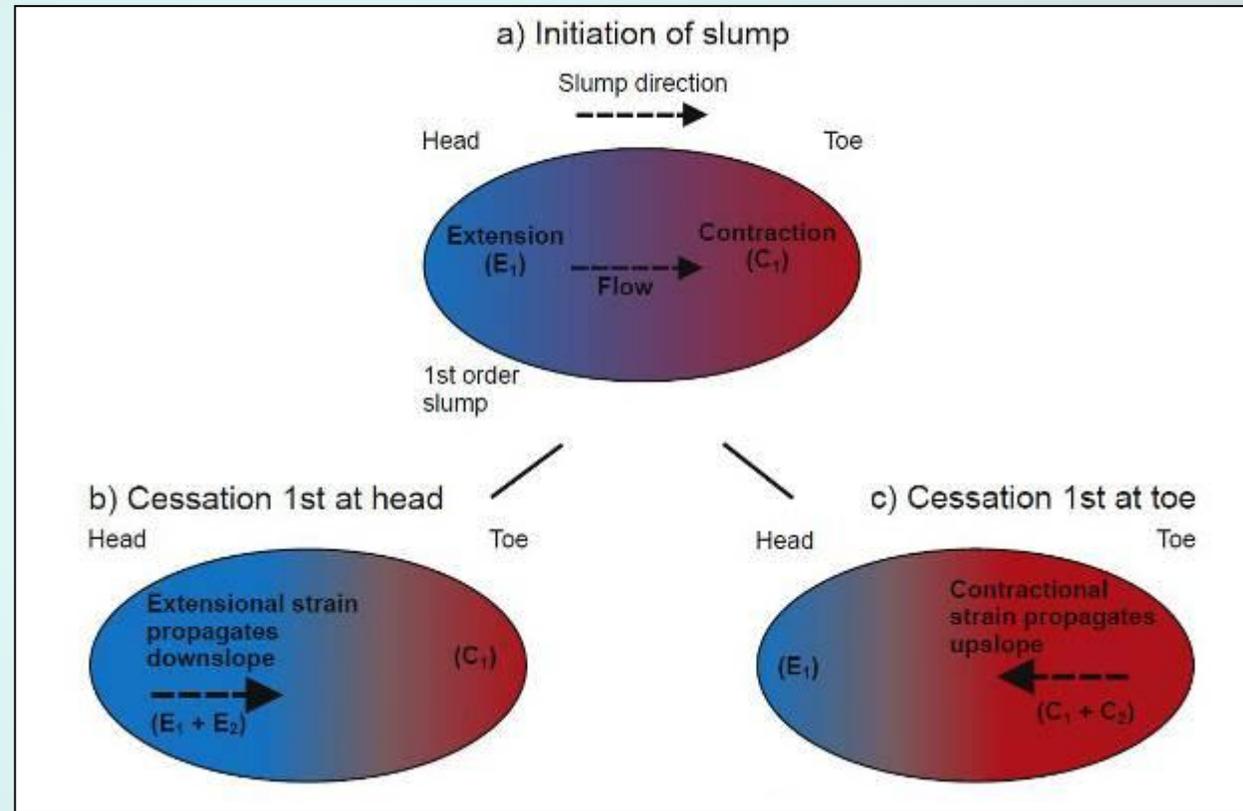
а – зона растяжения; б– зона сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом в горизонтальной плоскости (скашиванием). Скашивание преобладает; в– зона сочетания горизонтального сжатия со скашиванием. Сжатие преобладает

(no Alsop, Marco, 2013)

Зоны растяжения и сжатия могут перемещаться

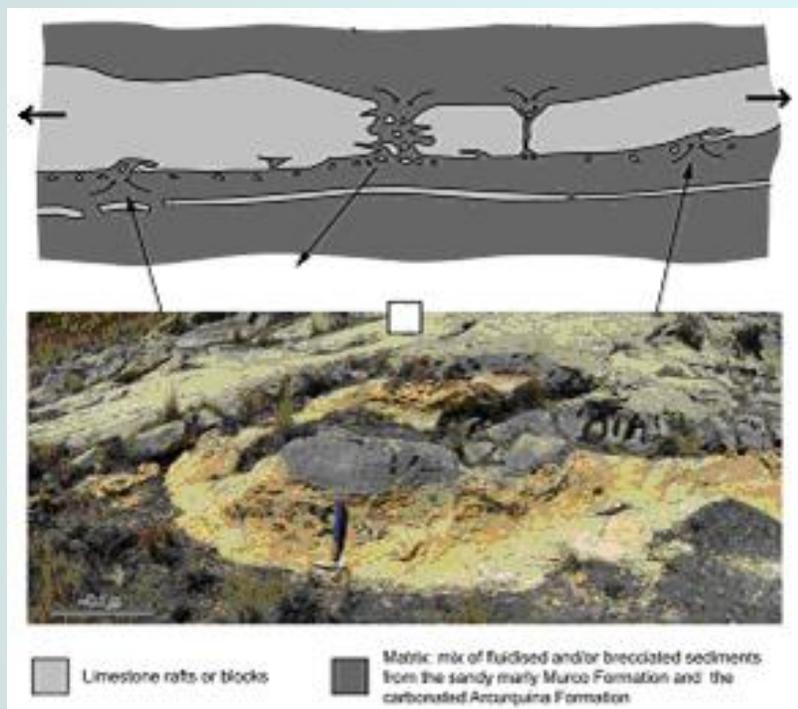


(Alsop, Marco, 2011)



(Alsop, Marco, 2013)

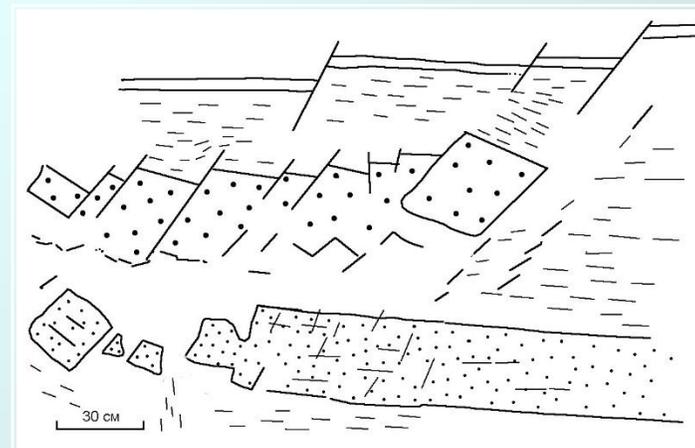
Примеры структур в зоне растяжения



(Callot et al., 2008)



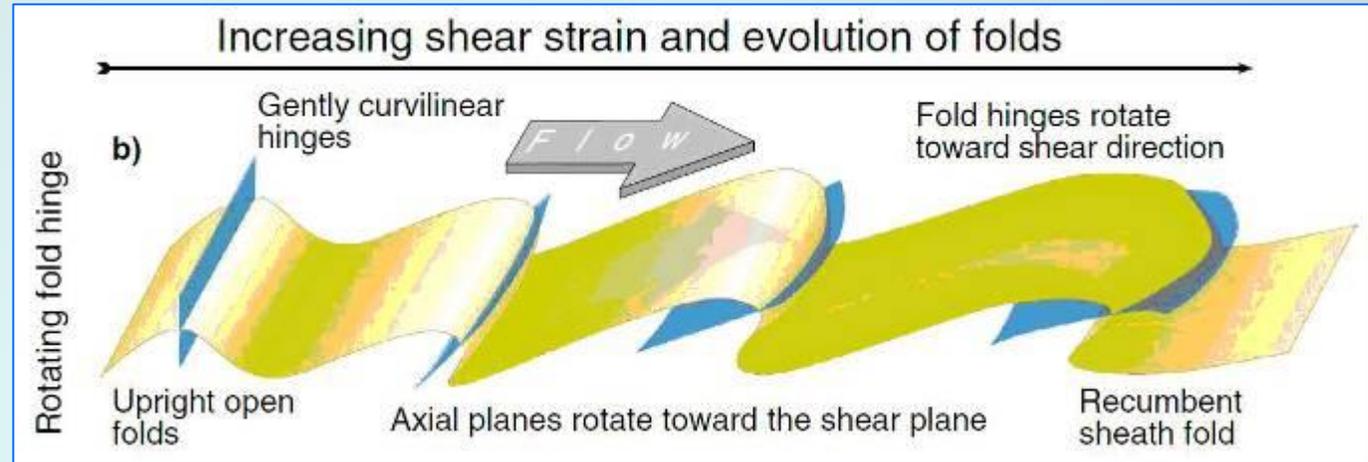
(Callot et al., 2008)



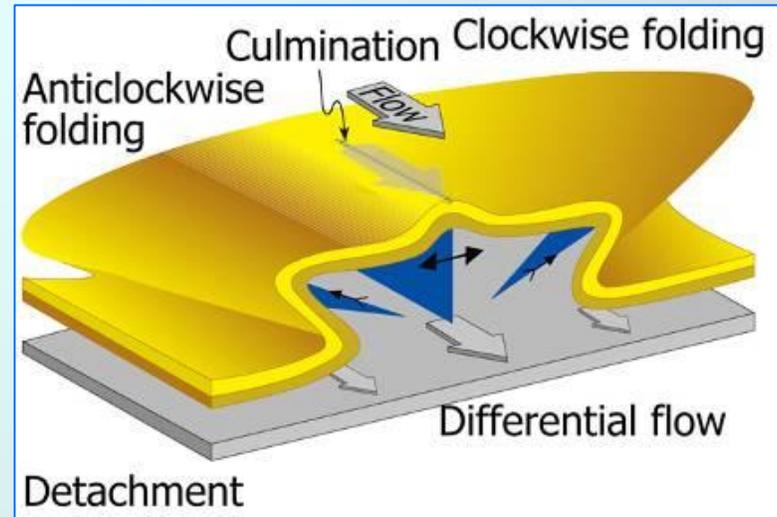
Таврическая серия, Крым

Дезинтеграции способствуют процессы разжижения и флюидизации

Складки в средней части слампа



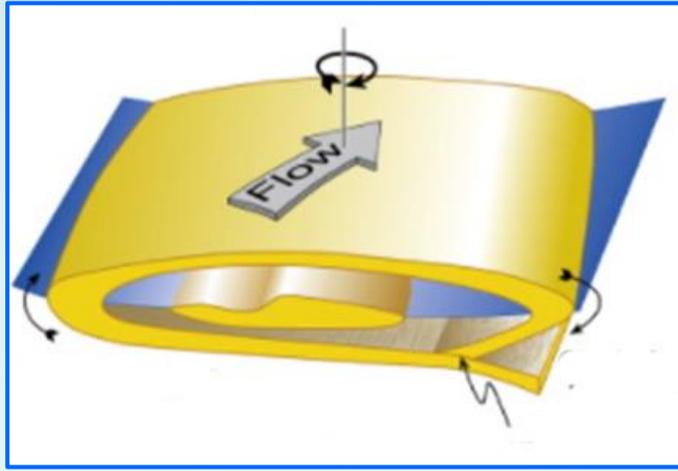
Модель формирования конических складок (Alsop, Marco, 2013)



(Alsop, Marco, 2011)

Здесь имеет место значительный, но неравномерный простой сдвиг. В этих условиях могут формироваться конические складки. Шарниры таких складок ориентированы по падению склона или косо к нему

В средней части слампа
бывают и такие складки



(G. Ian Alsop, Shmuel Marco)



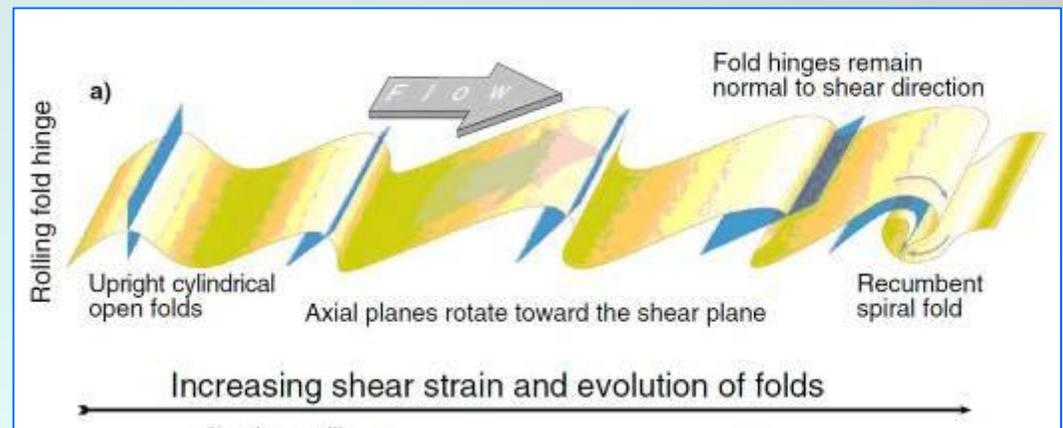
<https://www.pinterest.ru>



[https://blogs.agu.org/mountainbeltway/
2012/04/20/friday-folds-cape-liptrap/](https://blogs.agu.org/mountainbeltway/2012/04/20/friday-folds-cape-liptrap/)

Складки в средней и нижней части слампа

Здесь нередко развиваются спиралевидные складки



Модель развития спиралевидных складок (Alsop, Marco, 2013)

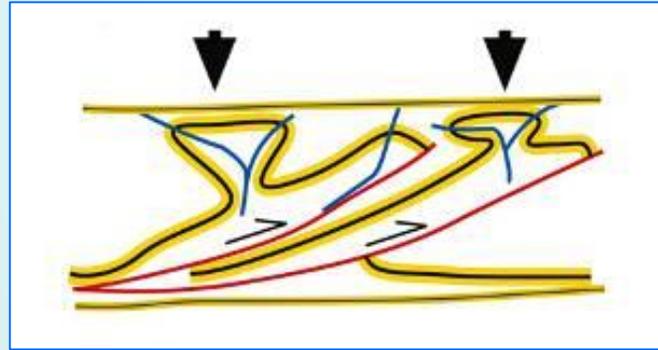
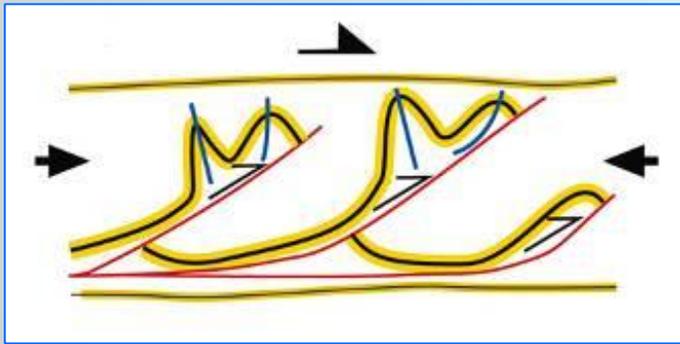
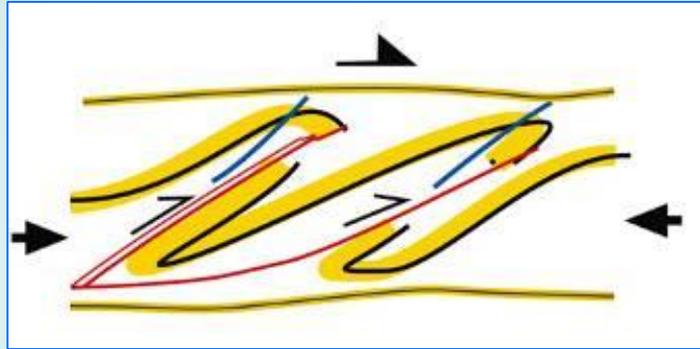
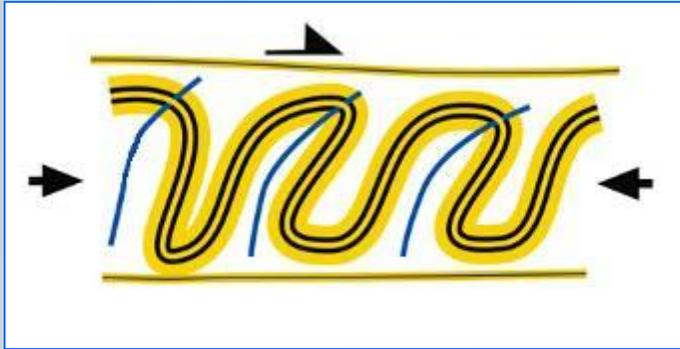


Интернет-ресурс



Складки, смятые в складки (спиралевидные складки). Бухта Лазурная. Крым.
Фото Н.С. Фроловой

Структуры, которые могут развиваться при прогрессивной деформации в теле слампа (*no Alsop, Marco, 2011*)



Грибообразная форма складки.
Таврическая серия. Крым.
Фото А.В. Муровской



Мелкие складки,
осложненные надвигами.
(Hwan Byun et al., 2019)

Складки в слоях таврической серии (Крым)

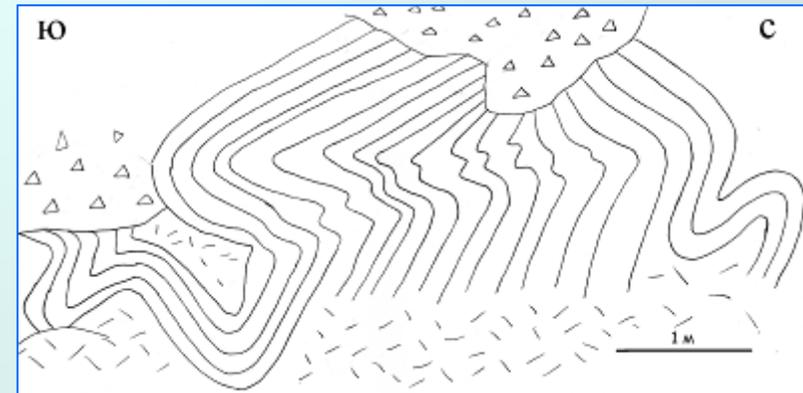
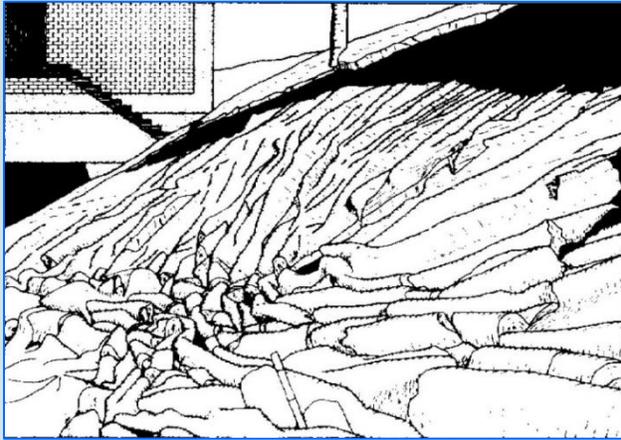
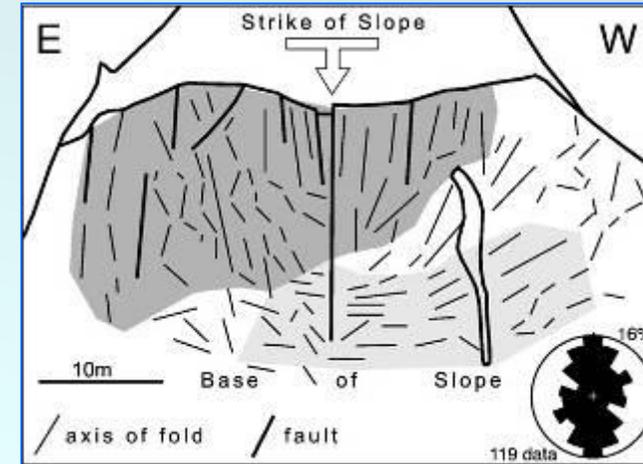


Фото и рис. Н.С. Фроловой

Ориентировка шарниров складок в слампах



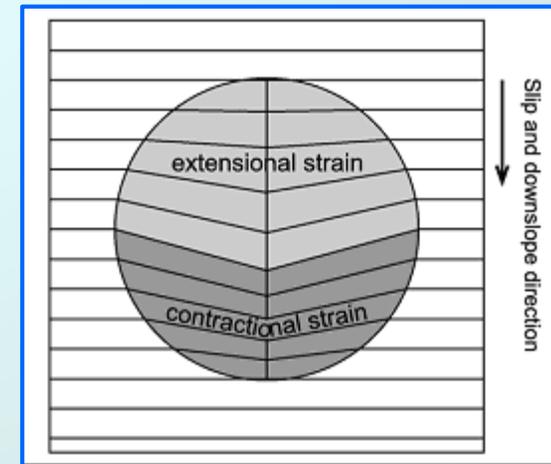
Снежный сламп, сформировавшийся на крыше кампуса (*Lajoie, 1972*)



«Природный эксперимент», Здесь показана ориентировка шарниров складок в «снежном слампе» (*Lajoie, 1972*)

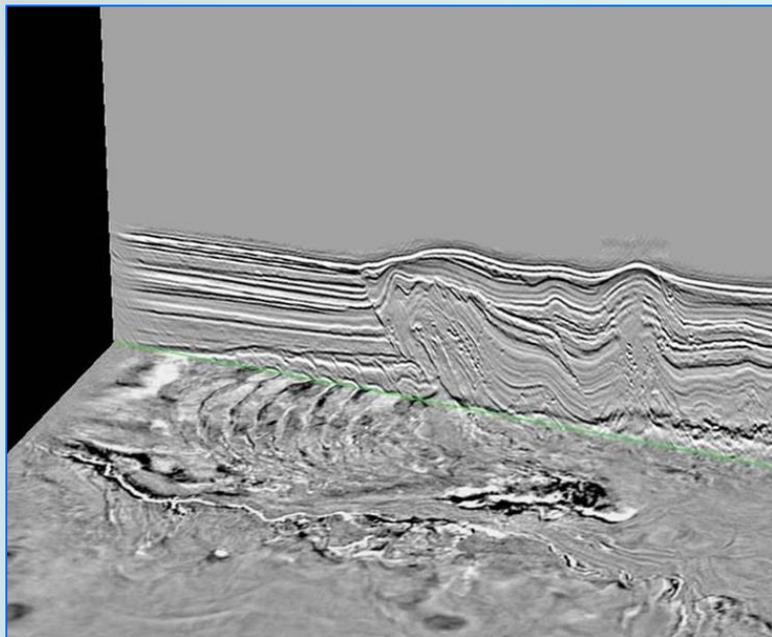


Ориентировка шарниров складок в движущемся вниз по склону леднике



Дислокационная модель (*no Ortner, 2007*)

Причины различной ориентировки шарниров в разных частях слампа



Оползневой поток по сейсмическим данным
(*Posamentier, Walker, 2006*)

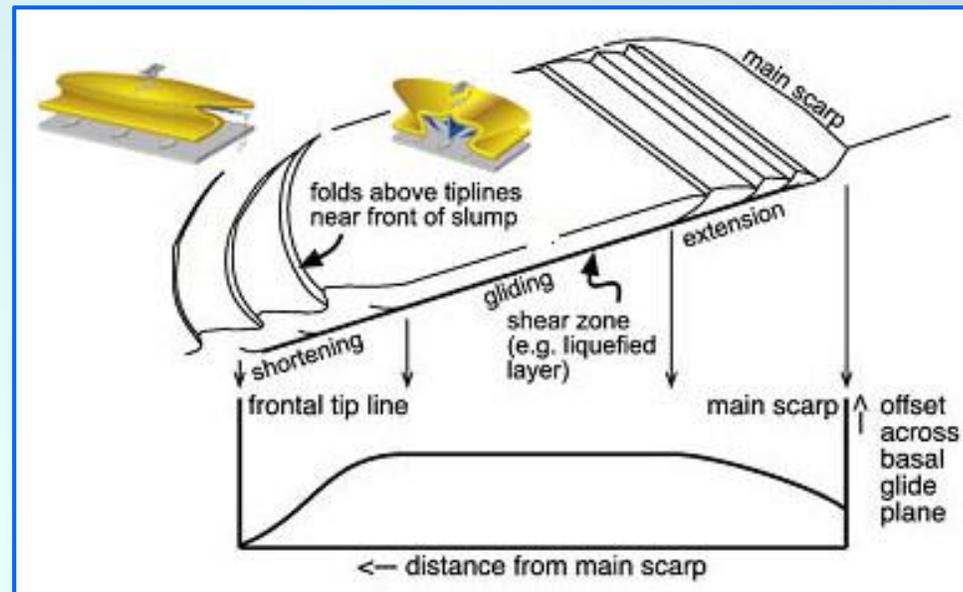


Схема (*Ortner, 2007*) с дополнениями
по (*Alsop, Marco, 2011*)

Для основания слампа характерно укорочение, вызванное торможением по склону. Главные структурные формы — цилиндрические складки, нарушенные многочисленными сингенетичными разрывами, а также взбросами и надвигами. В основании шарниры складок ориентированы перпендикулярно направлению падения склона, а вергентность этих складок показывает направление транспорта масс.

В промежуточной зоне преобладает укорочение с большой сдвиговой компонентой, благодаря чему широко распространены конические складки. Осевые поверхности этих складок ориентированы вниз по склону

Структурный парагенез
сочетания
горизонтального сжатия
с горизонтальным сдвигом
в горизонтальной
плоскости (скашиванием)

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ СТРУКТУРНОГО ПАРАГЕНЕЗА ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОДВОДНО- ОПОЛЗНЕВОЙ СКЛАДЧАТОСТИ

Чередование в разрезе складчатых участков (сламповых пластин) с пачками параллельно залегающих слоев

- Наличие срыва в основании слампа
- Наличие зональности в сламповой пластине (зоны растяжения, транспорта и сжатия с характерными структурными формами).
- Сочетание складок со структурами деформации мягких осадков, сформировавшимися на месте (например, *flame structures*)
- Отсутствие структурных парагенезов, присущих консолидированным осадкам
- Наличие некоторых характерных только для мягких осадков складчатых форм
- Резкая дисгармония складок, не связанная с о свойствами деформируемых пачек. Резкое изменение наклона осевых поверхностей складок.
- Асимметрия складок, вплоть до ее крайней степени. Сочетание асимметричных складок со взбросами и надвигами
- Разнообразная ориентировка шарниров складок

Структурный парагенез сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом в горизонтальной плоскости:

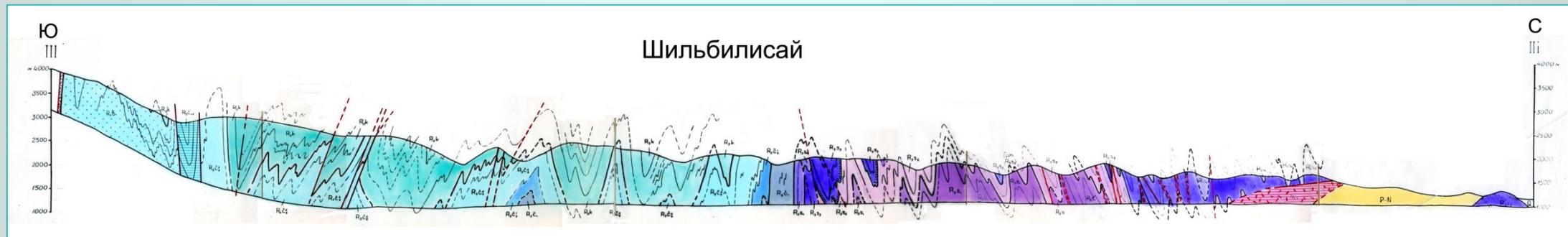
Это все без исключения складчатые области (пока мы рассмотрели внутренние части этих областей), однако соотношение сдвига и сжатия в них разное. В любом случае структурообразование начинается с формирования складок

Это подводно-оползневая складчатость

Это складчато-надвиговые области внешних частей складчатых сооружений (*fold-thrust belts*), но там деформация осуществляется иначе. Эти области будут рассмотрены в дальнейшем

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УКРОЧЕНИЯ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ РАЗРЕЗАМ

Как вы думаете, какова здесь величина укорочения?



**Структурно-геологический разрез пересечению вдоль реки Шильбилисай.
Северный склон Таласского хребта, Северный Тянь-Шань.
Авторы: Н.С. Фролова и А.Г. Малюжинец**

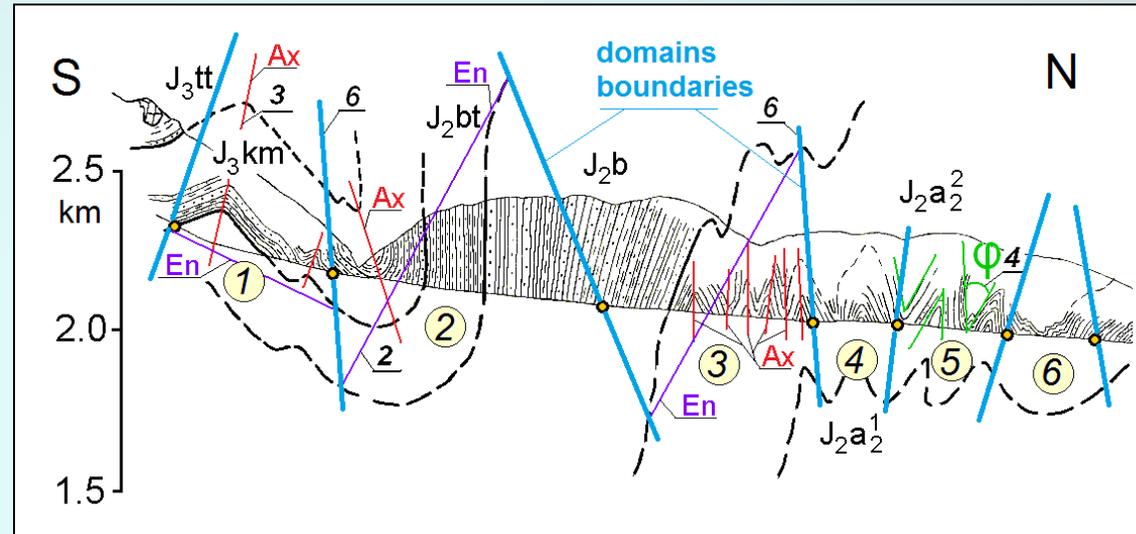
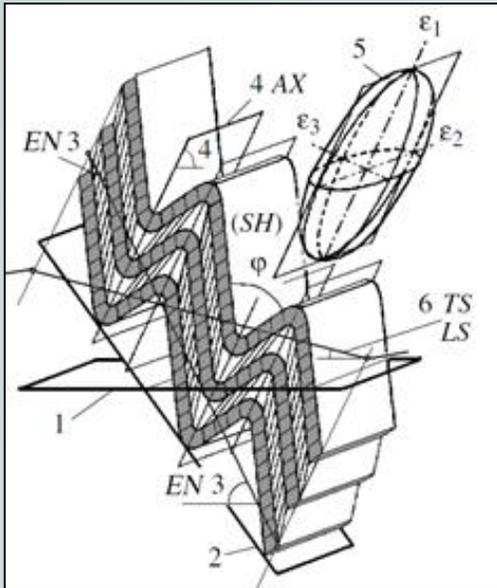
МЕТОД Ф.Л. ЯКОВЛЕВА (2017)

Следует иметь ввиду наличие иерархии структур различного порядка, в которой объекты каждого уровня (размера) обладают собственными морфологическими характеристиками, а кинематические модели их формирования, соответственно, требуют различных методов определения значений укорочения. Основным объектом для предлагаемого способа балансировки профиля является "складчатая область" размером 0,2-1 км. Она объединяет несколько складок одинаковой морфологии, деформация которых описывается деформацией эллипсоида (эллипса). Используя некоторые кинематические операции ретродеформации, эллипс возвращается в состояние окружности, а слоистая среда исследуемой области – в свое горизонтальное состояние. Дальнейшее объединение таких доскладчатых областей формирует доскладчатое состояние всего профиля и его частей, что позволяет определить величину его укорочения.

Процедура восстановления доскладчатого состояния одного складчатого домена состоит из трех последовательных кинематических операций: (1) поворот домена до горизонтальное положения исходной слоистости, (2) горизонтальный простой сдвиг до вертикального положения осевой плоскости и (3) горизонтальное удлинение или чистый сдвиг до "выпрямления" складок (см. рис.). Все операции изменяют наклон и длину сегмента линии профиля. В результате в горизонтально-слоистой среде сегмент линии сечения в домене приобретает другой наклон и длину. Последовательное сложение всех областей с учетом смещения вдоль разломов позволяет составить общее доскладчатое состояние вдоль исследуемого поперечного сечения (см. рис.).

Определение величины деформации и восстановление структуры (Яковлев, 2017)

Метод построения разрезов, сбалансированных по объему осадочного чехла

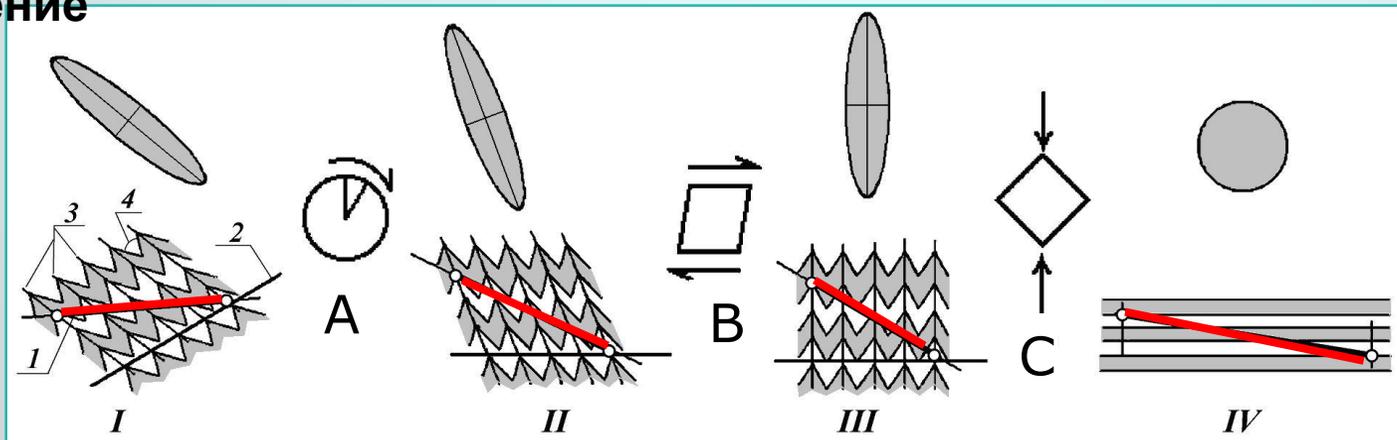


Последовательность операций:

А – поворот

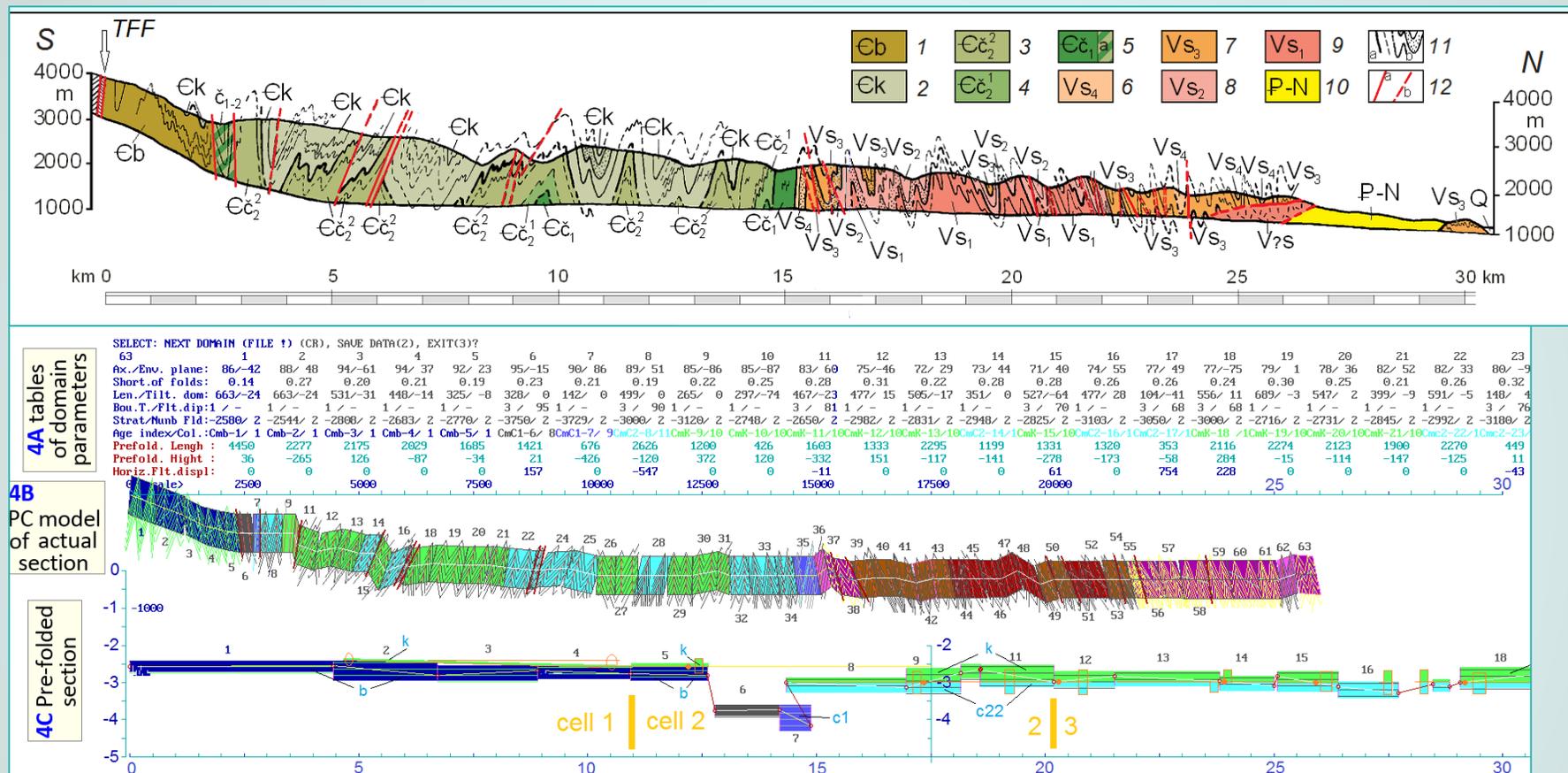
Б – горизонтальный простой сдвиг

В – растяжение



В результате преобразований:
 1) исходный эллипс становится кругом.
 2) Отрезок линии профиля в доскладчатом состоянии домена приобретает другую длину и наклон относительно исходной слоистости.

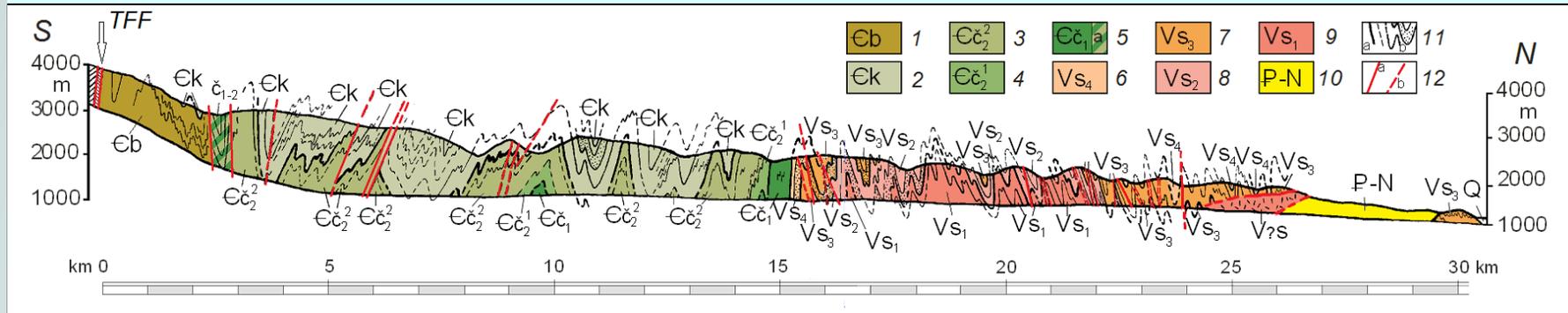
Существует специальная программа Ф.Л. Яковлева (2017)



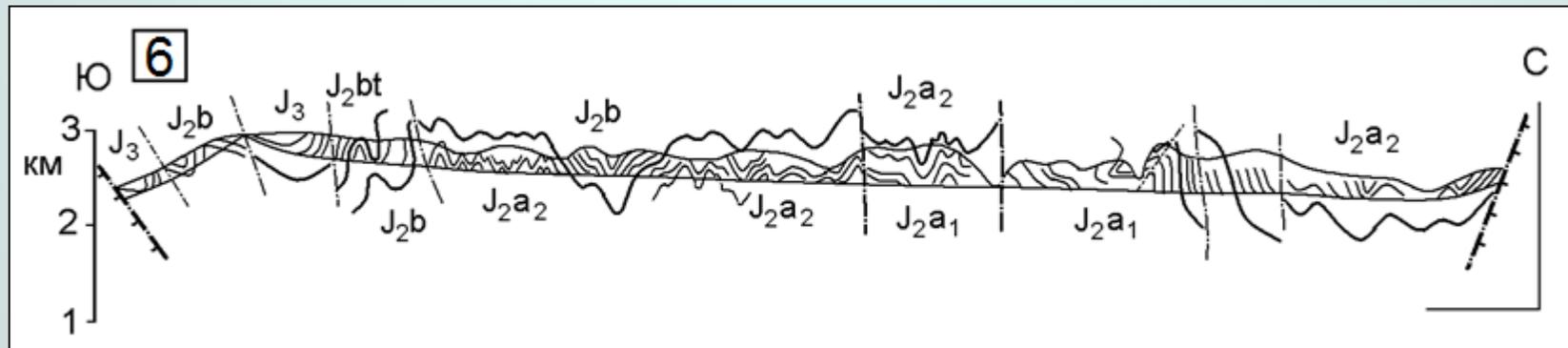
Вверху – геологический разрез по р. Шильбилисай, Таласский хр. Северного Тянь-Шаня (по А.Г. Малюжинцу и Н.С. Фроловой).

Внизу – результат действий, выполненных с использованием программы (Ф.Л. Яковлев)

Величина укорочения



Северный склон Таласского хребта 3,8-5,5 (в среднем 4,6)
(по Ф.Л. Яковлеву)



Большой Кавказ 0,9-3 в среднем 2,0 (Яковлев, 2015)

