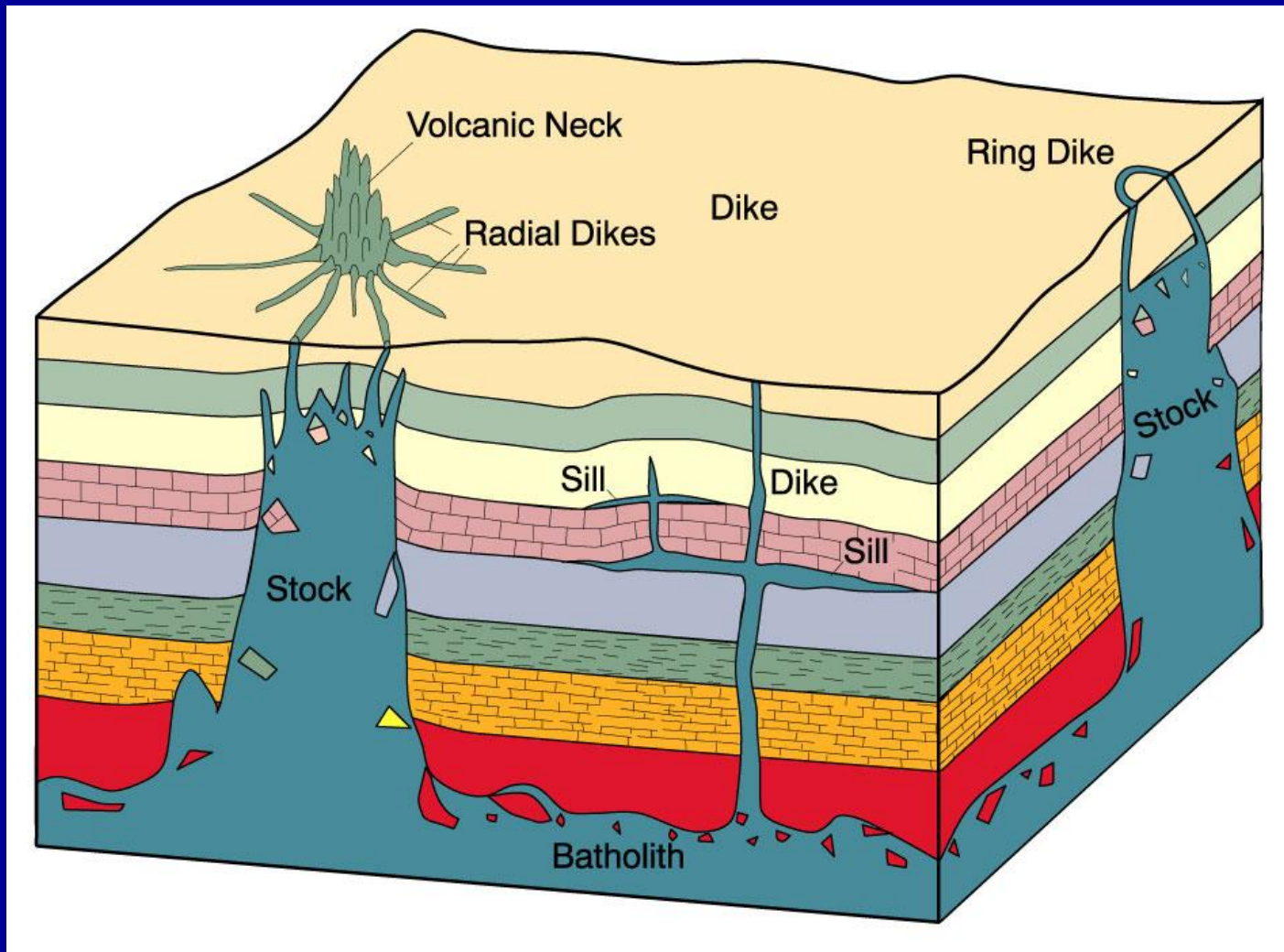


Плутонические массивы

- аллохтонные
- автохтонные
- протрузивные

- синкинематические (синтектонические)
- посткинематические (посттектонические)
- докинематические

Аллохтонные плутонические массивы



Морфологические типы аллохтонных интрузивов

Неконформные
дискордантные
несогласные

Штоки

Линейные интрузивы

Лакколиты

Этмолиты

Дайки

“Cactolith: a quasi-horizontal chonolith composed of anastomosing ductoliths whose distal ends curl like a harpolith, thin like a sphenolith, or bulgediscordantly like an akmolith or ethmolith”

«Кактолит: квазигоризонтальный хонолит, состоящий из скрещенных дактолитов, на периферии изгибающихся подобно гарполиту, маломощный, как сфенолит, или дискордантно выпуклый, как акмолит или этмолит»

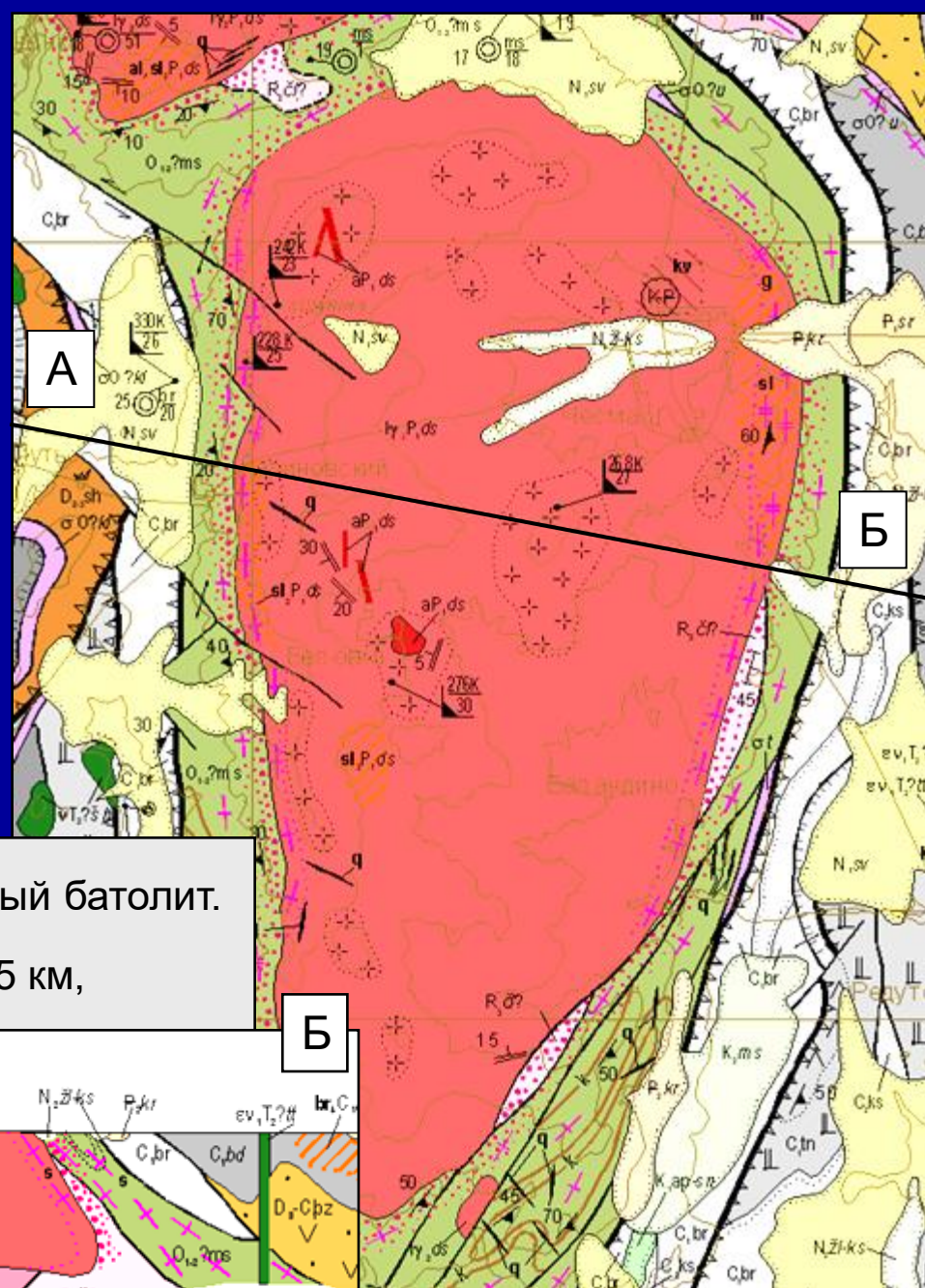
(Hunt, 1953 – Геологический словарь)

Батолиты – крупные массивы площадью более 100 км², сложенные, как правило, гранитами и гранодиоритами. Контакты всегда секущие.

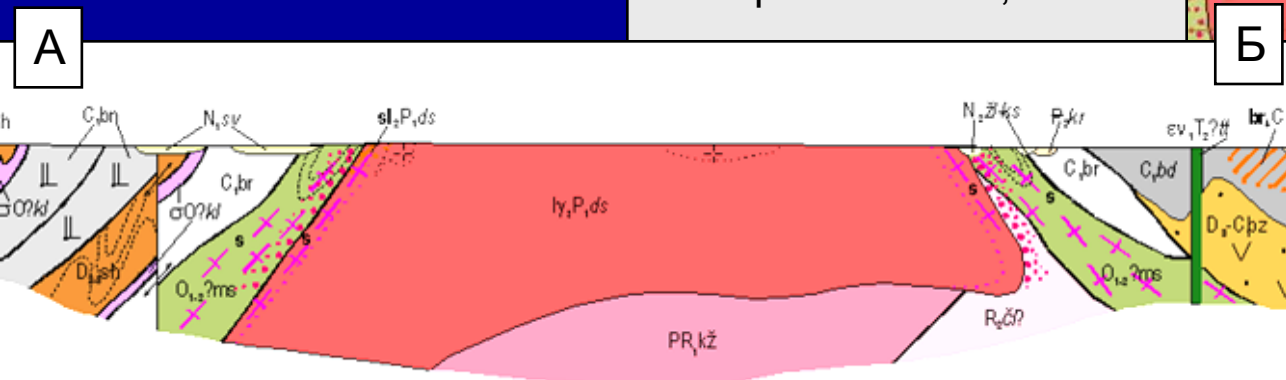
Ранее батолиты представлялись бескорневыми телами, уходящими на большую глубину.

На самом деле форма батолитов в разрезе напоминает язык, поскольку практически всегда они имеют четко выраженную "подшву".

Нижняя граница батолитов изучается либо геофизическими методами, либо по данным бурения.



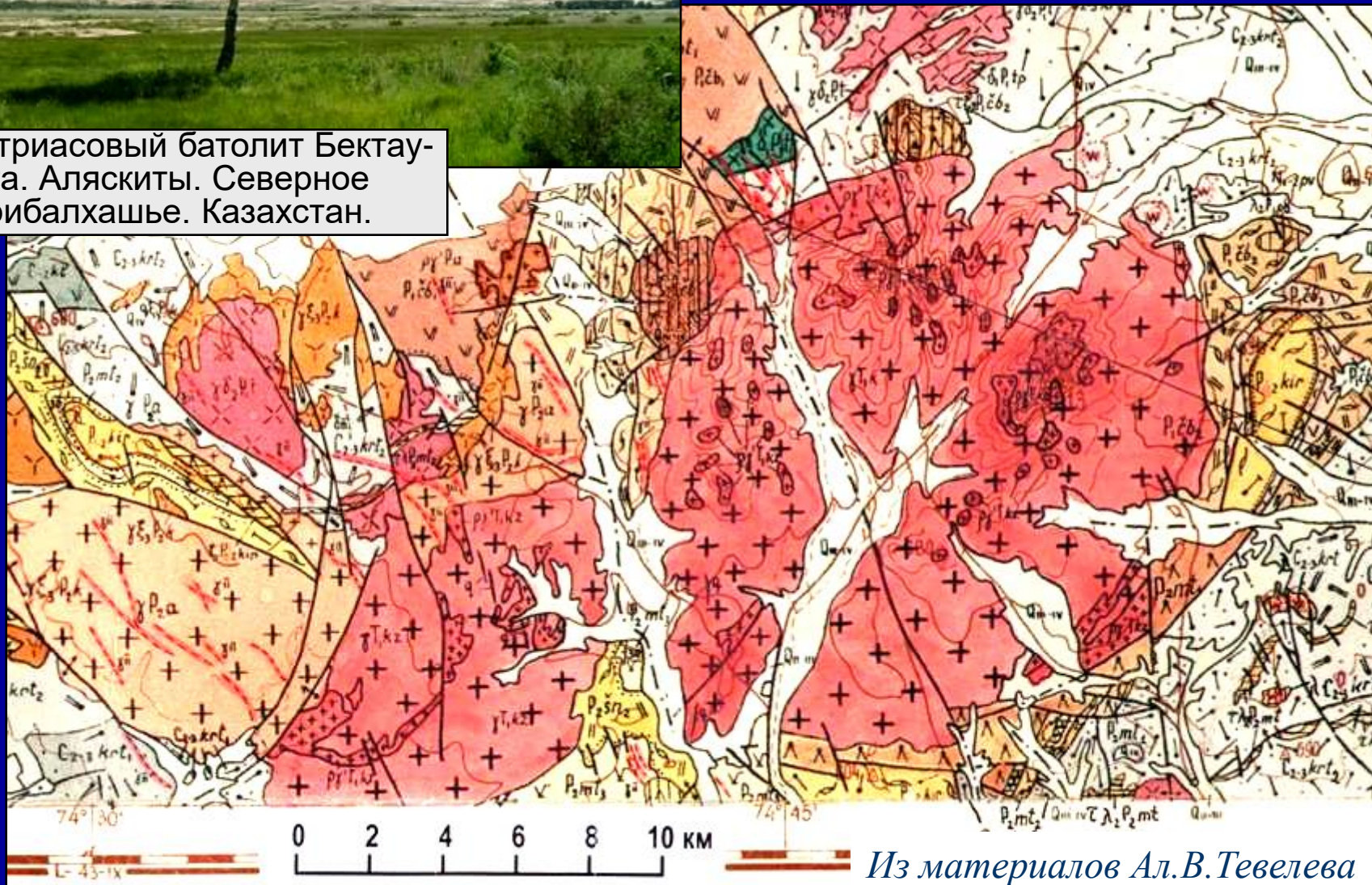
Чесменский лейкогранитовый батолит. Южный Урал. Размеры 30×15 км,



Из материалов Ал.В.Тевелева

Геодинамическая обстановка формирования батолитов – окраинно-континентальные или коллизионные пояса.

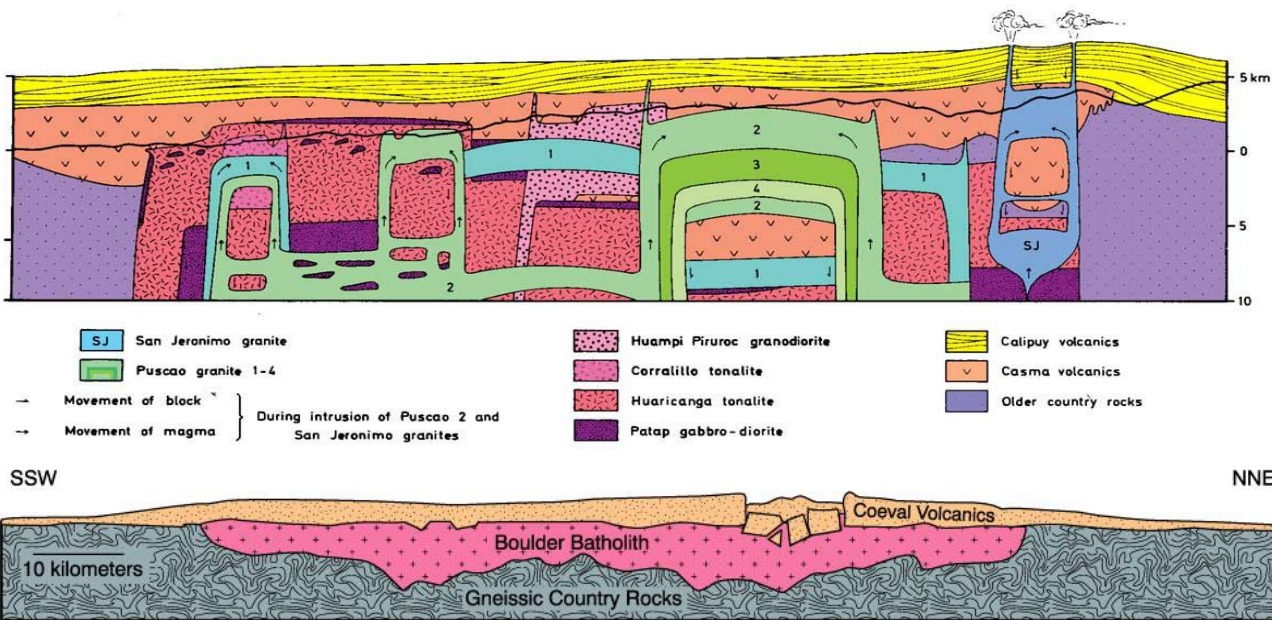
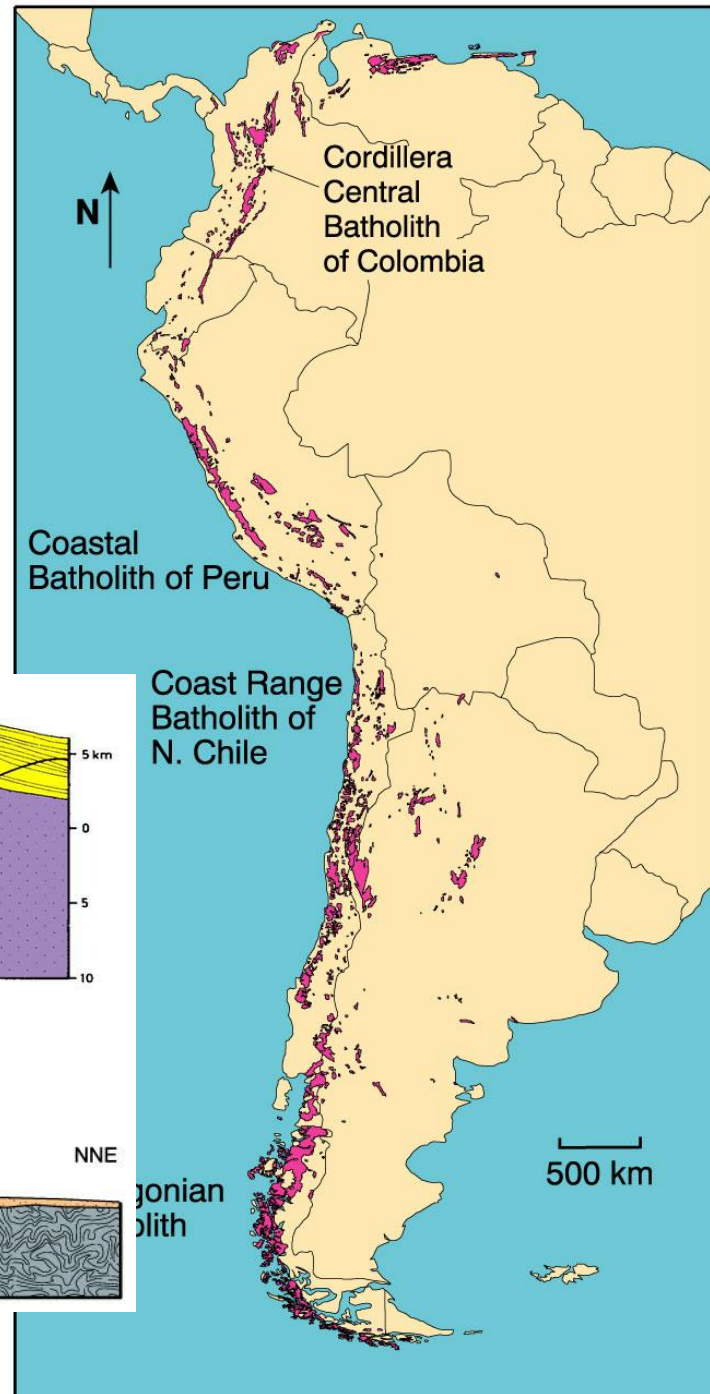
Раннетриасовый батолит Бектау-Ата. Аляскиты. Северное Прибалхашье. Казахстан.



Из материалов Ал.В.Тевелева

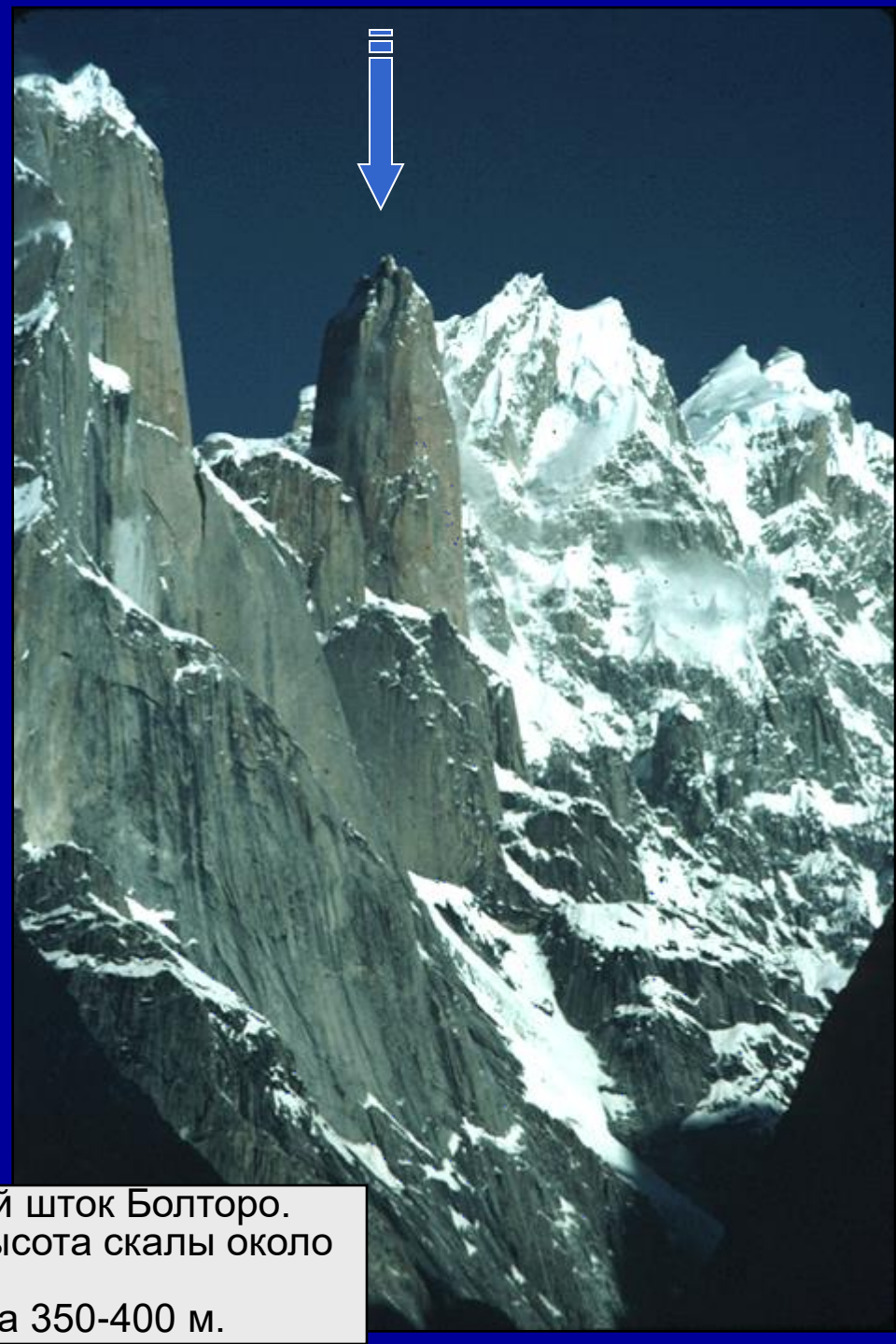
Батолиты Анд

«Кальдер-плутоны»

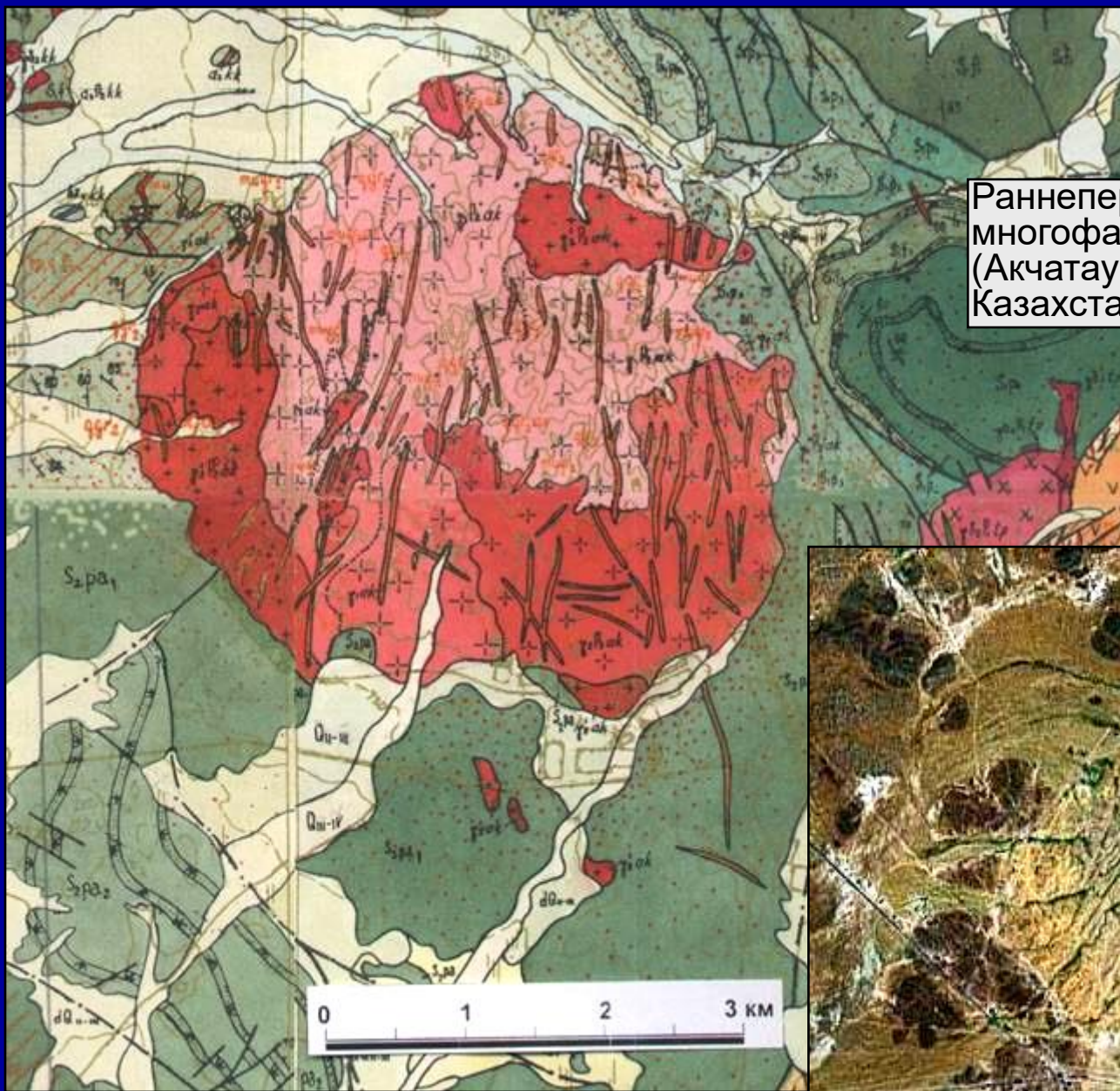


Штоки – массивы площадью менее 100 км², сложенные, как правило, гранитоидами. Контакты всегда секущие. Обычно штоками называют интрузивы цилиндрической формы с вертикальными контактами или примерно изометричные в плане массивы неясной формы.

Стандартной геодинамической обстановки нет, могут формироваться в разных обстановках, обычно – в вулкано-плутонических поясах разного генезиса.



Монцонитовый шток Болторо.
Каракорум. Высотаскалы около
1 км.
Диаметр штока 350-400 м.

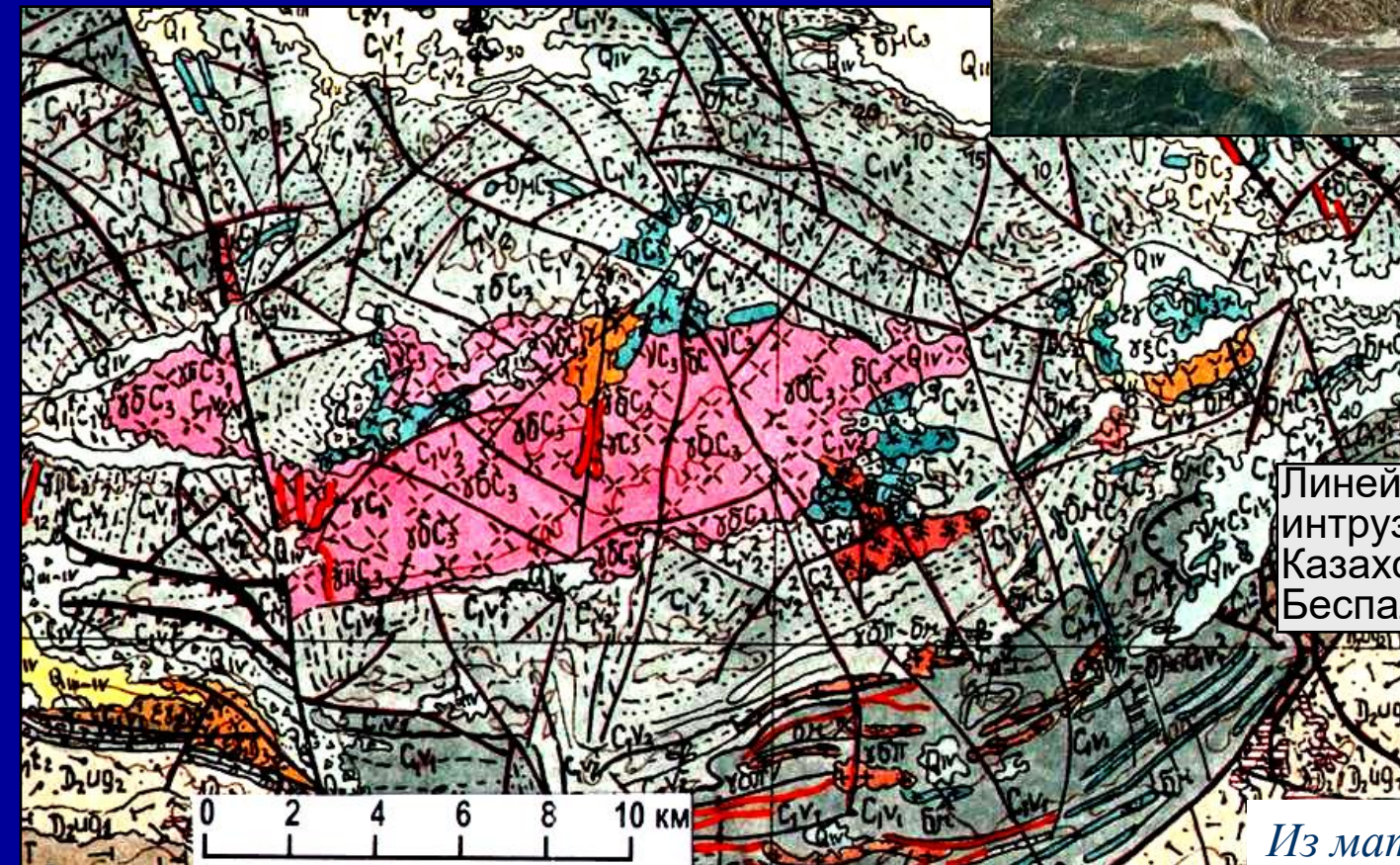
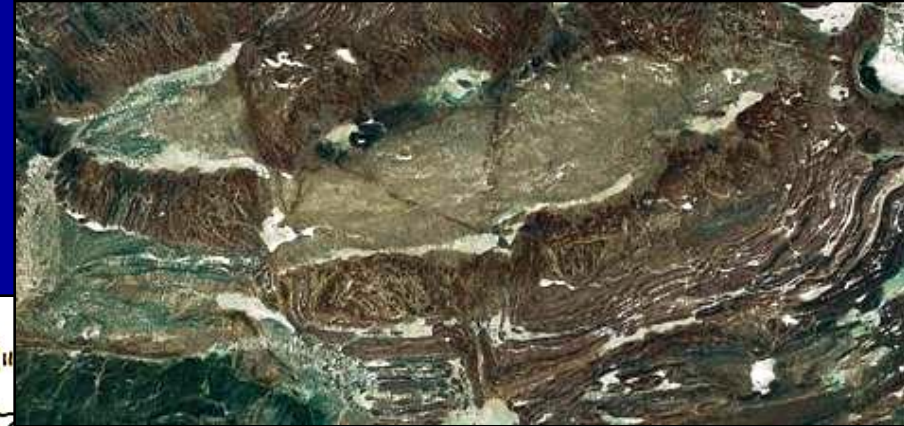


Раннепермский многофазный шток Кызыл (Акчатау). Аляскиты. Ц. Казахстан



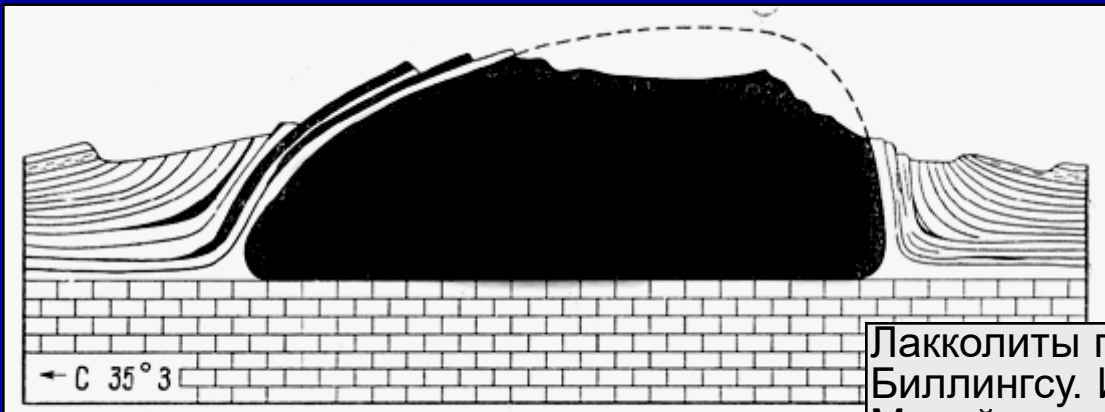
Линейные интрузивы – удлиненные массивы, у которых в плане длина существенно превышает ширину. Сложены самыми разнообразными породами от ультрамафитов до лейкогранитов.

Линейные интрузивы обычно бывают приурочены к разрывам, но эта связь не всегда очевидна. От даек они отличаются тем, что не ограничены параллельными поверхностями

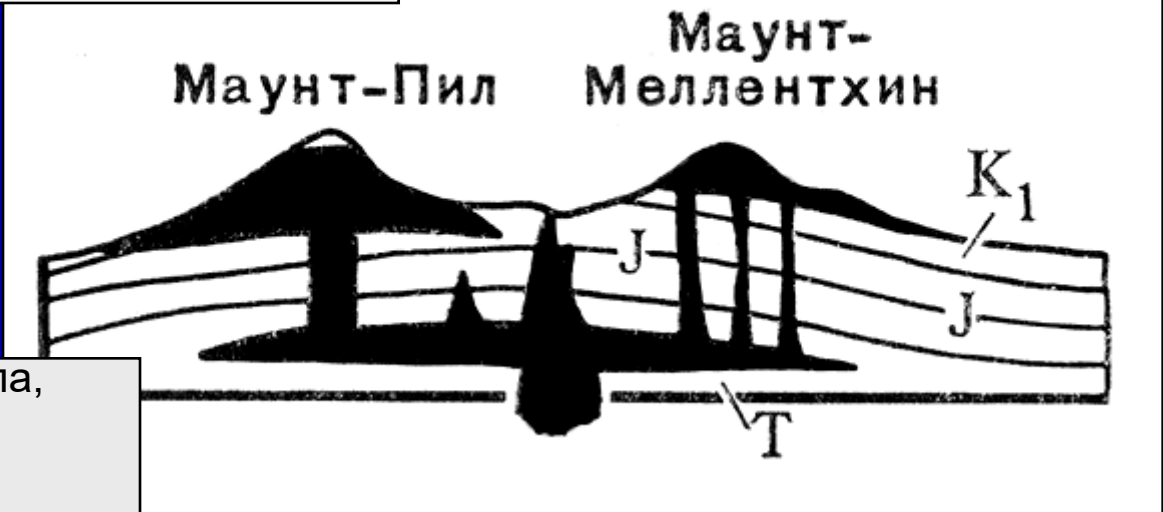
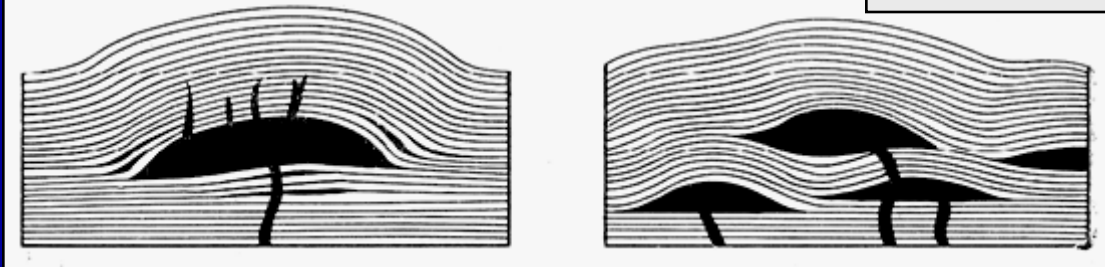


Линейный многофазный интрузив Толкудук. Ц. Казахстан (по В.Ф. Беспалову, 1982)

Лакколиты – небольшие грибообразные тела, границы которых конформны поверхностям напластования вмещающих пород.



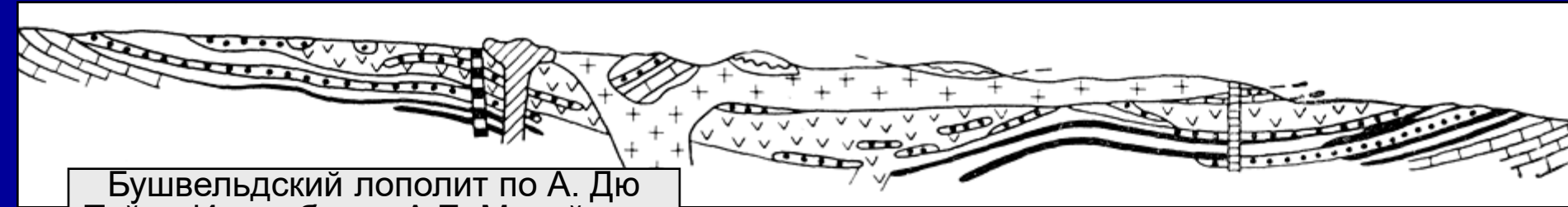
Лакколиты по М.П. Биллингсу. Из учебника А.Е. Михайлова



Лакколиты Ла-Салла, США по А. Ирдли. Из учебника В.В. Белоусова

Лополиты – блюдцеобразные тела, границы которых конформны поверхностям напластования вмещающих пород. Сложены обычно основными, ультраосновными и щелочными породами.

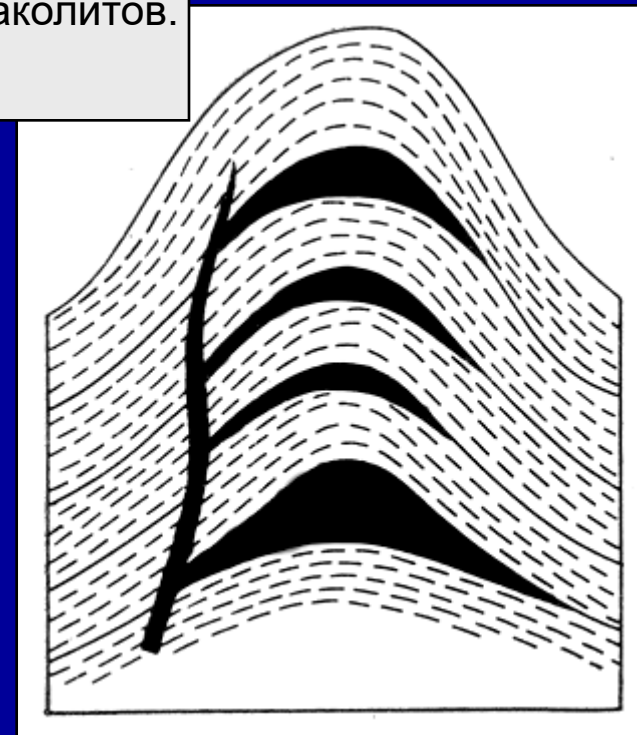
Лополиты, как правило, формируются в платформенных условиях.



Бушвельдский лополит по А. Дю Тойту. Из учебника А.Е. Михайлова

Схема строения факолитов. Из учебника А.Е. Михайлова

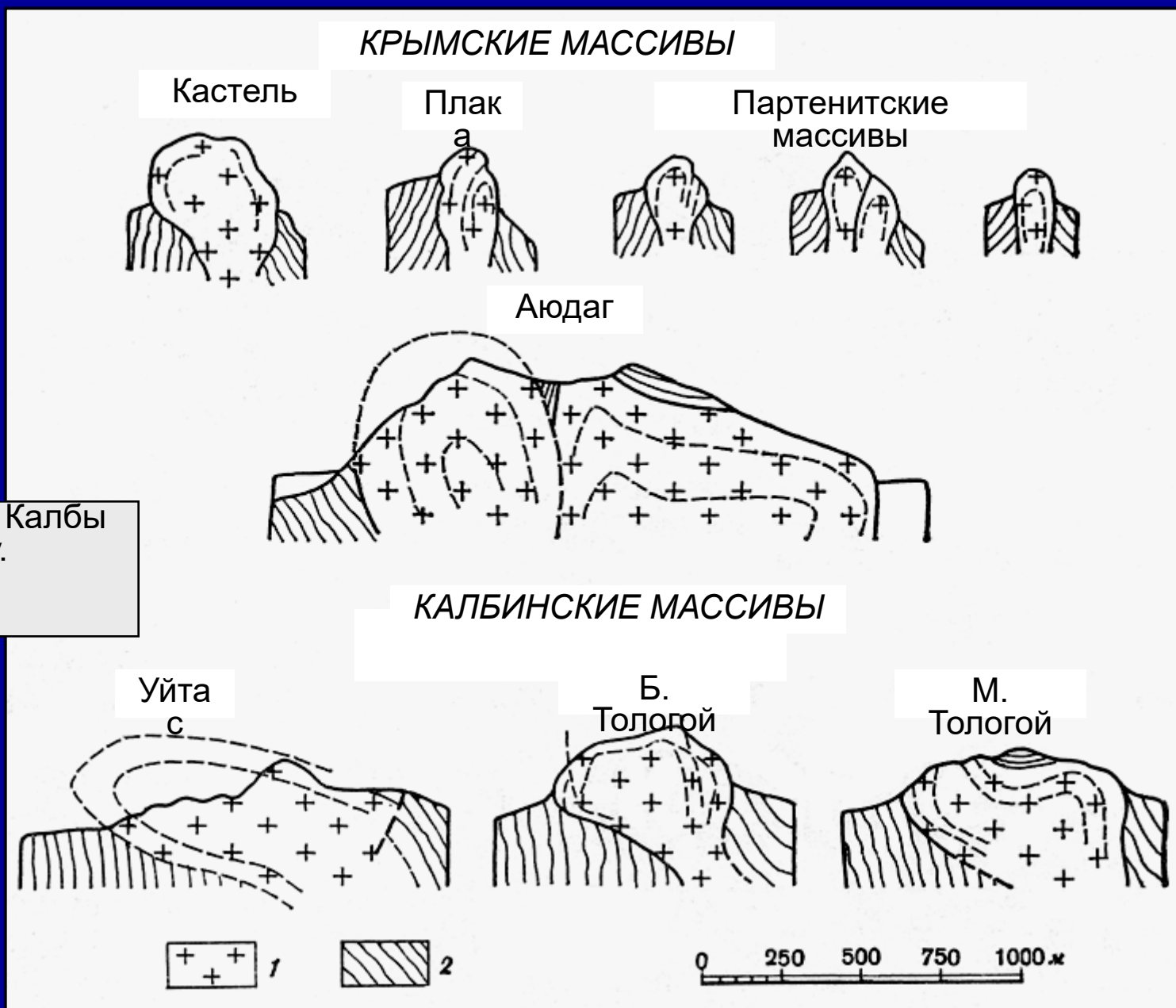
Факолиты – небольшие интрузивы серповидной в разрезе формы, границы которых конформны поверхностям напластования вмещающих пород; в большинстве случаев залегают в ядрах антиклинальных складок. Как правило, факолиты являются синскладчатыми образованиями.



Магматические диапиры – небольшие вертикально расположенные интрузивы веретенообразной или грушевидной формы с секущими контактами

Обычно магматические диапиры активно воздействуют на вмещающие породы, деформируя их.

Массивы Крыма и Калбы по В.Н. Павлинову.
Из учебника В.В. Белоусова

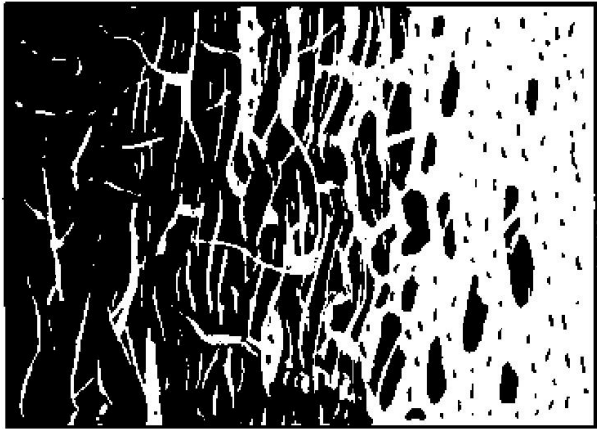


Силлы – чаще всего небольшие плитообразные, стенообразные тела, конформные поверхностям напластования вмещающих пород (межпластовые интрузивы). Они часто залегают на строго определенном стратиграфическом уровне, но иногда косо секут пакки стратифицированных пород

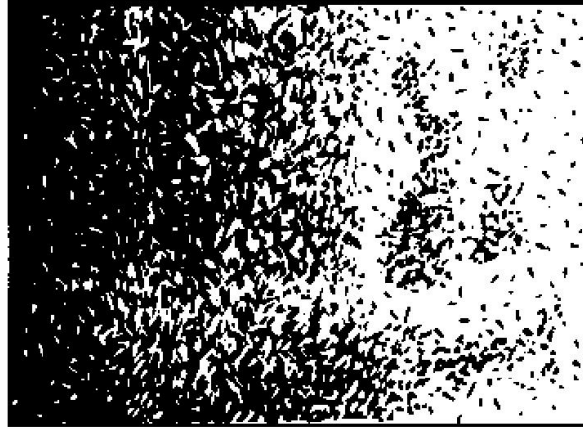


Силлы долеритов в палеозойских осадочных толщах. Сибирская платформа (фото Р.В. Веселовского)

Контакты интрузивов: взаимодействие магмы с вмещающими породами



a. Injected



b. Permeated



c. Combination

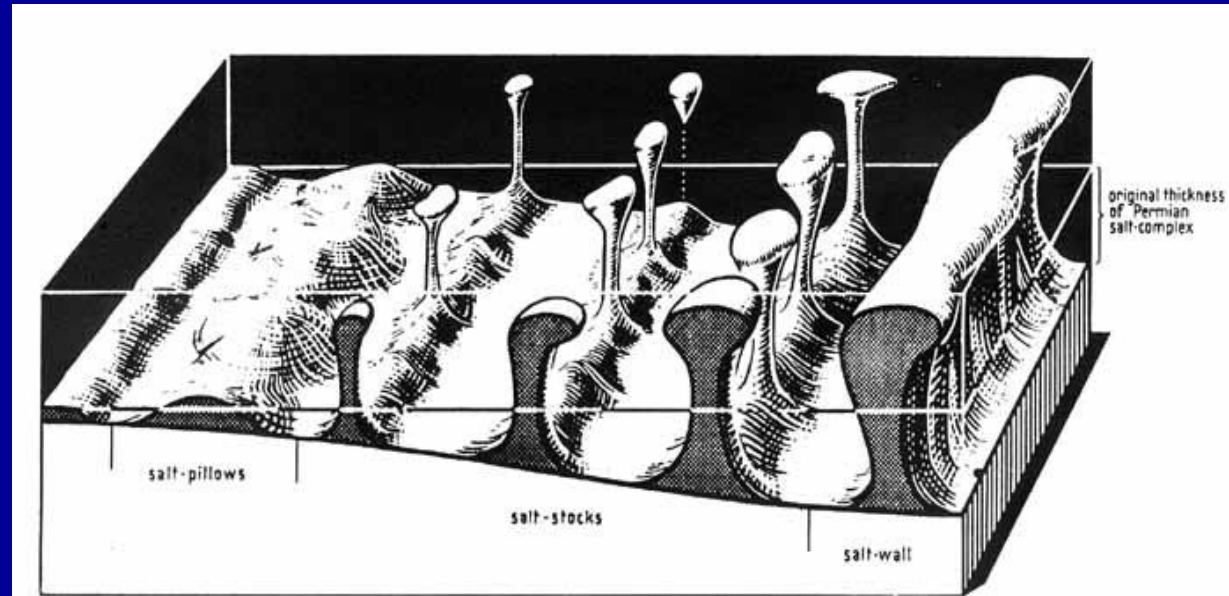
Эндоконтакт: зоны закалки

Экзоконтакт: роговики, скарны

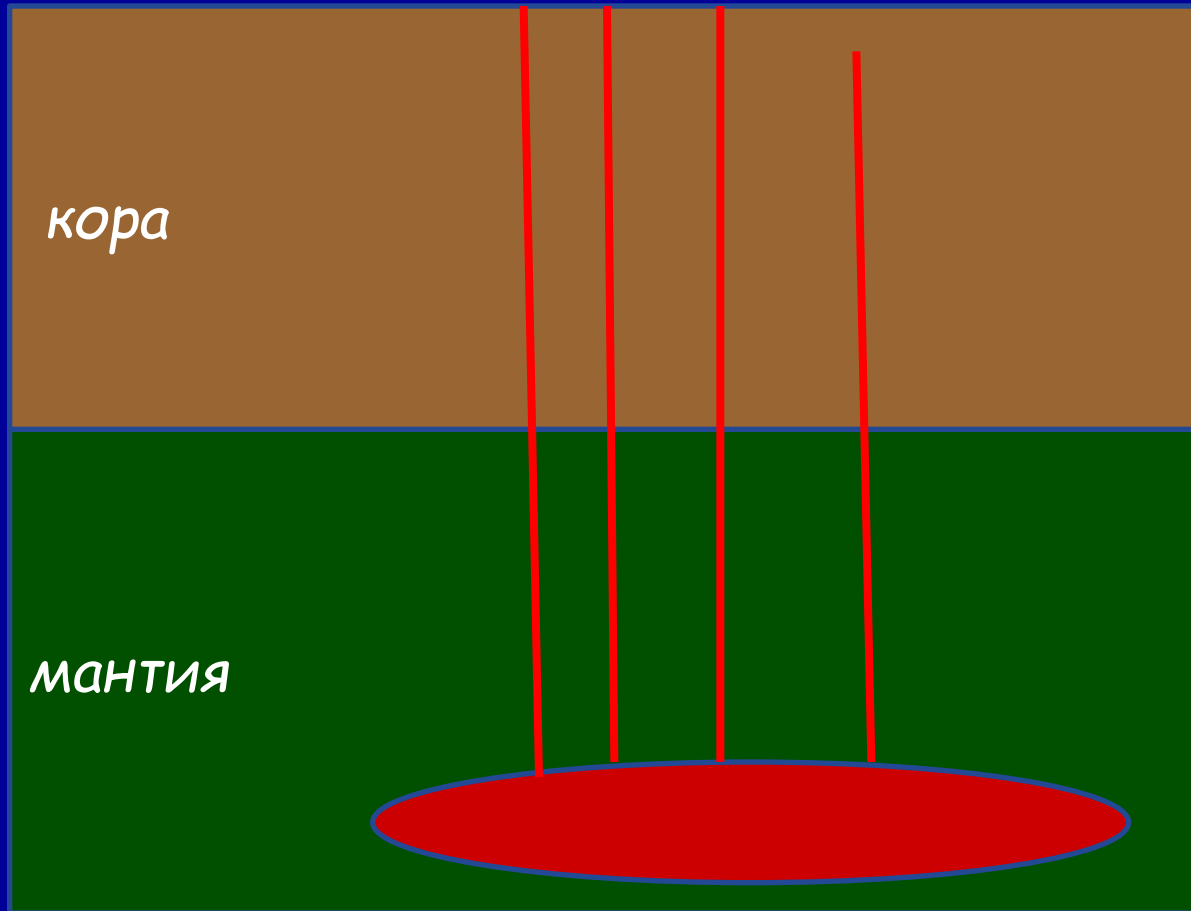
Модель подъем магм: соляные диапиры

подъем магмы за счет
дефицита плотности
(Архимедова сила)

- Недостаток структурных свидетельств;
- Только в условиях пластической деформации;
- Не объясняет подъем магм с отрицательной плавучестью;



Локальный сброс давления в зонах растяжения: подъем магмы с отрицательной плавучестью



- Подъем по системе дайкообразных подводящих каналов;
- Связь с региональным деформационным режимом;
- Пульсационный характер внедрения

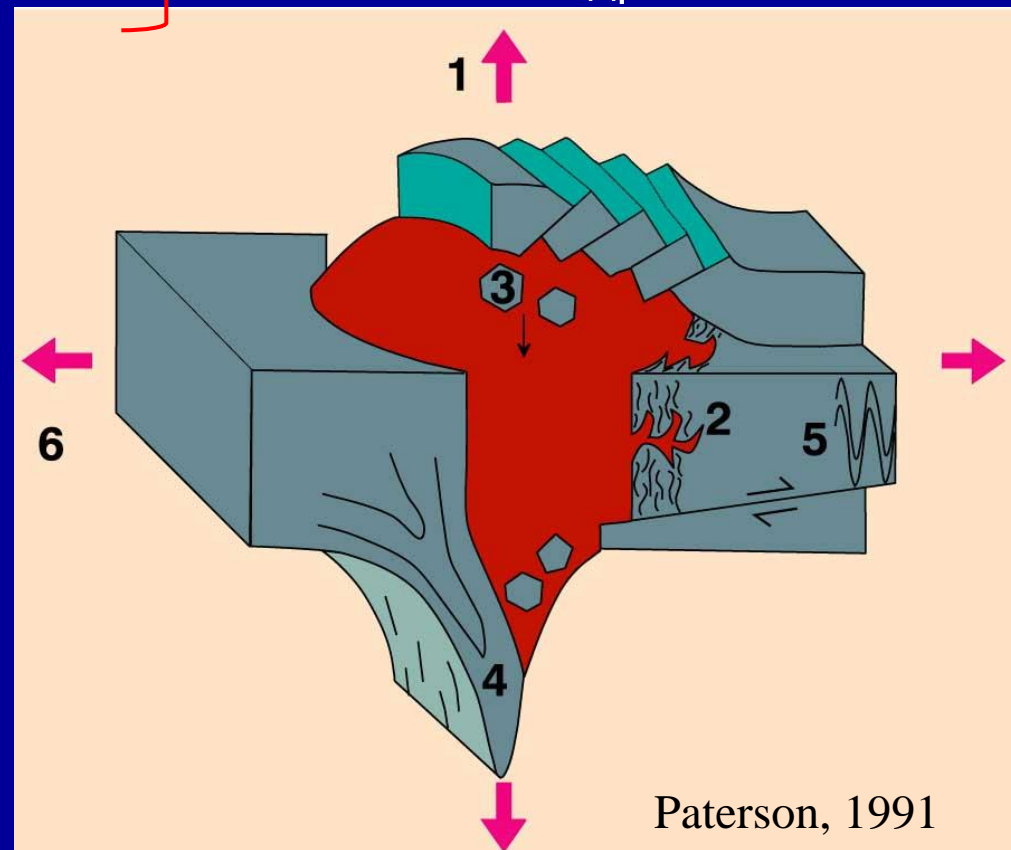
Интрузивные тела: решение проблемы пространства

Возможные механизмы внедрения интрузивного массива:

1. Подъем кровли;
2. Ассимиляция вмещающих пород;
3. Погружение блоков вмещающих пород;
4. Пластические деформации вмещающих пород;
5. Латеральное смещение вмещающих пород;
6. Внедрение в зону растяжения;

Активное внедрение

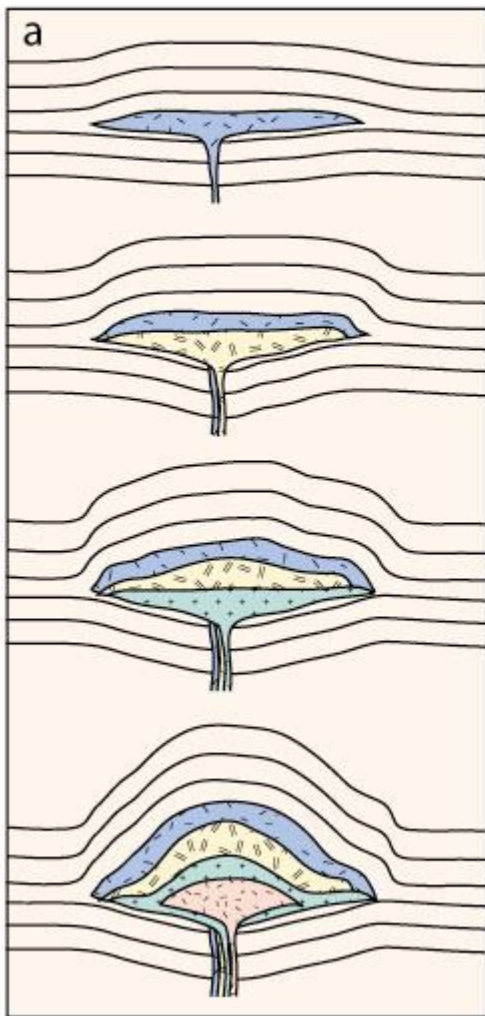
Пассивное внедрение



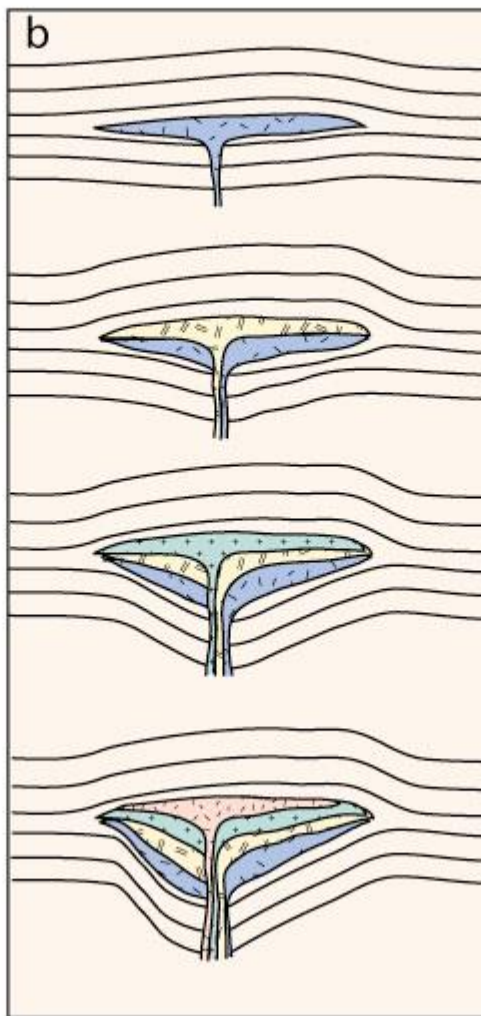
Paterson, 1991

Модели формирования многофазных гранитных батолитов

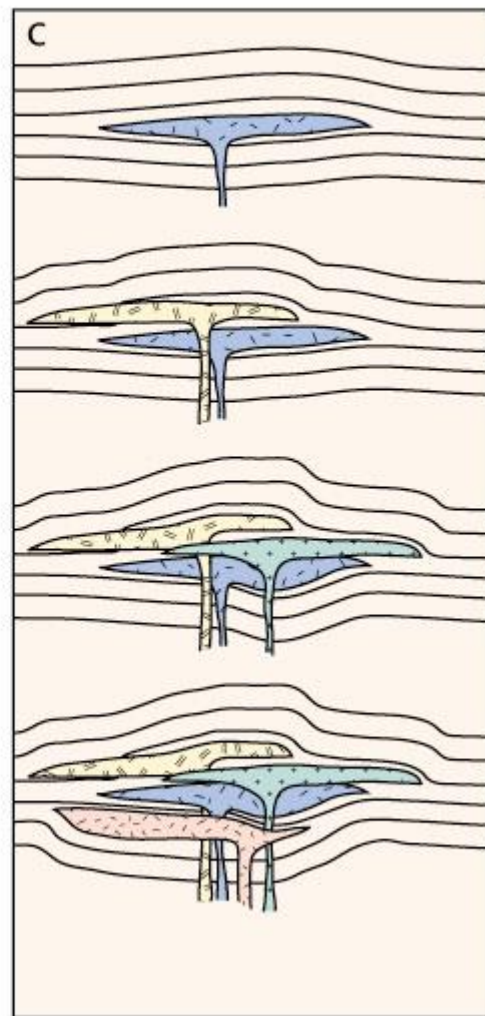
Downward-building
laccolith



Upward-building
lopolith



Irregular and
unsystematic



Фации глубинности интрузивов

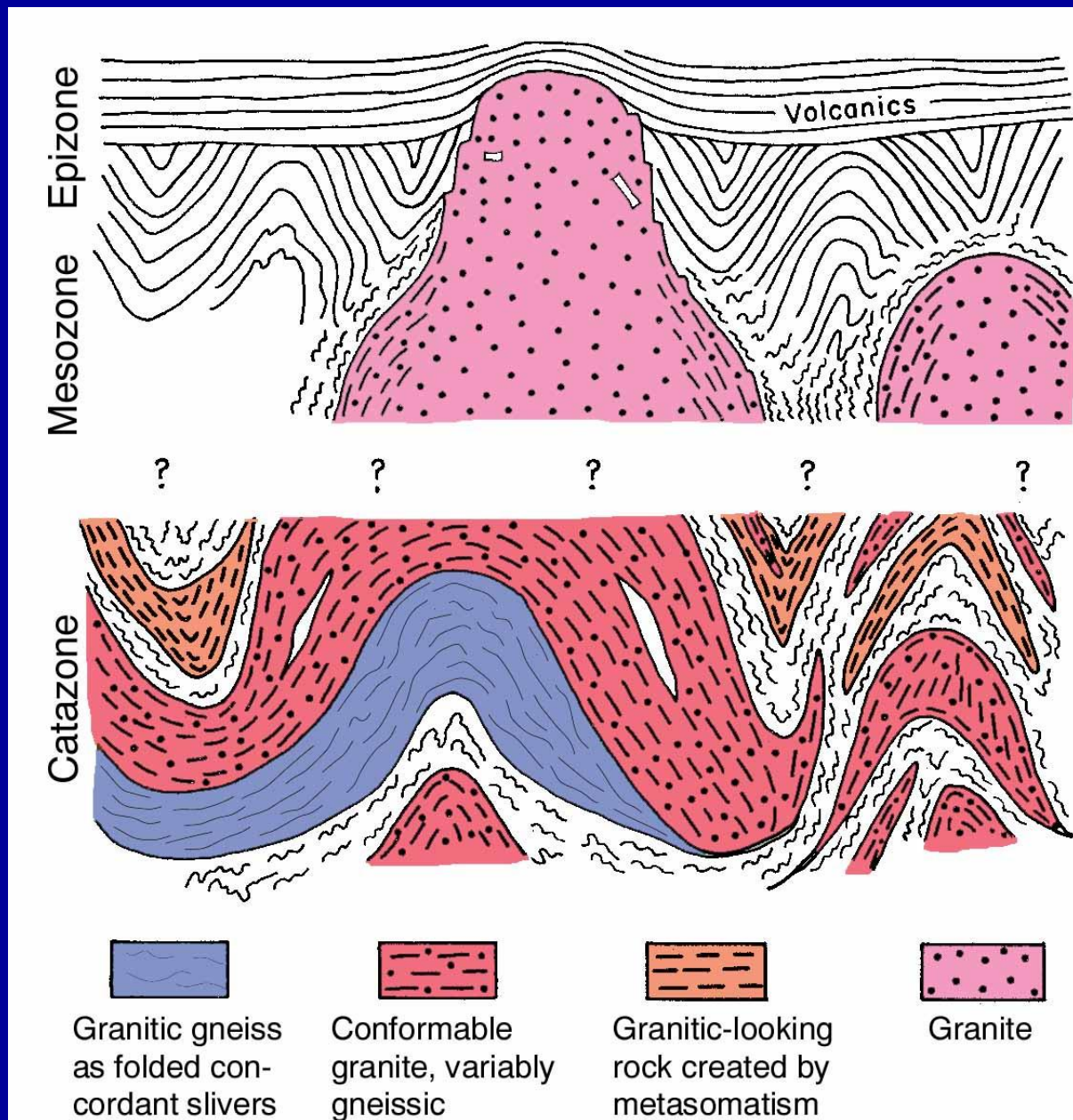
гипабиссальные
(малоглубинные,
приповерхностные)

мезоабиссальные
(среднеглубинные)

3-15 км

абиссальные
(глубинные)

Связь между массивами
мезо- и катазоны?



Признаки массивов различной глубинности:

1. Контактные зоны:

Эпизона – выраженный эндоконтакт

Мезозона – максимальные экзоконтактные ореолы (роговики, скарны)

Катазона – автохтонные плутоны без интрузивных контактов



Экзоконтактная зона гранитного массива: скарны с дайками гранитоидов. Хакасия. Фото А. Федоровой

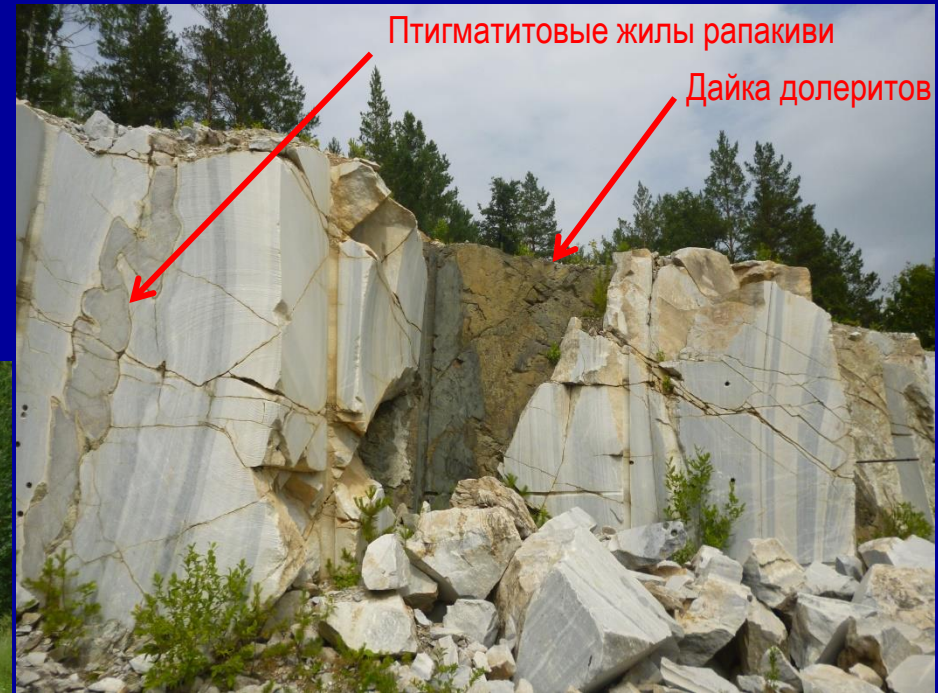


Послойные мигматиты: метамонцитонитоиды с инъекциями лейкогранитов. Ю.Урал. Фото А.В. Тевелева

Признаки массивов различной глубинности:

2. Степень метаморфизма (вмещающие породы)

Дайки долеритов в смятых в птигматитовые складки мраморах и гранитах рапакиви. Экзоконтакт Бердяушского массива, Ю. Урал. Фото М.Б. Аносовой



Птигматитовые жилы рапакиви

Дайка долеритов

Мигматиты в приконтактной зоне Чашковского массива, Ю. Урал.

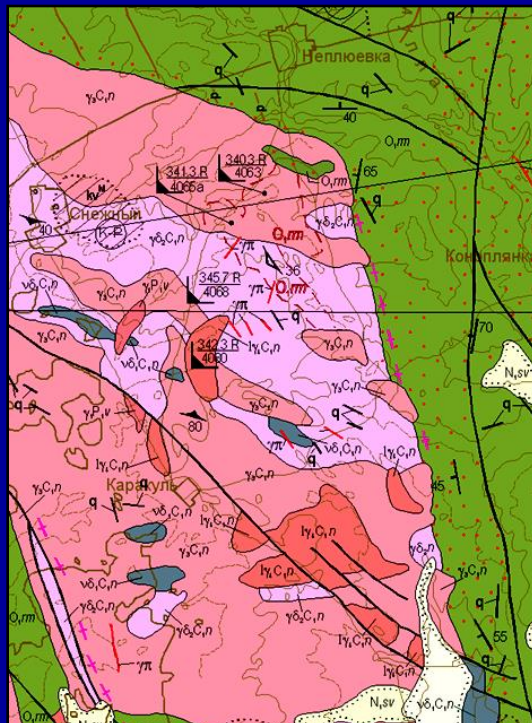
Признаки массивов различной глубинности:

3. Механизм внедрения.

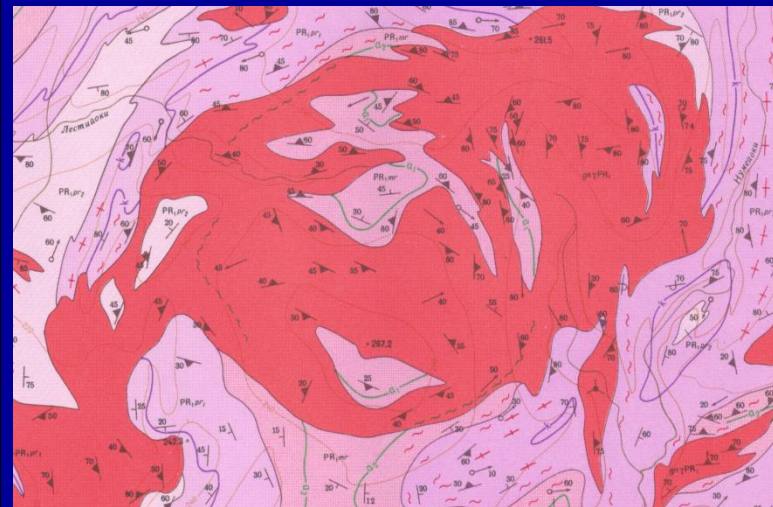
Эпизона – «активная»; часто приурочены к палеокальдерам, вулканическим аппаратам

Мезозона – связь с ослабленными зонами, разрывными нарушениями

Катазона – пластические деформации, конформны вмещающим породам

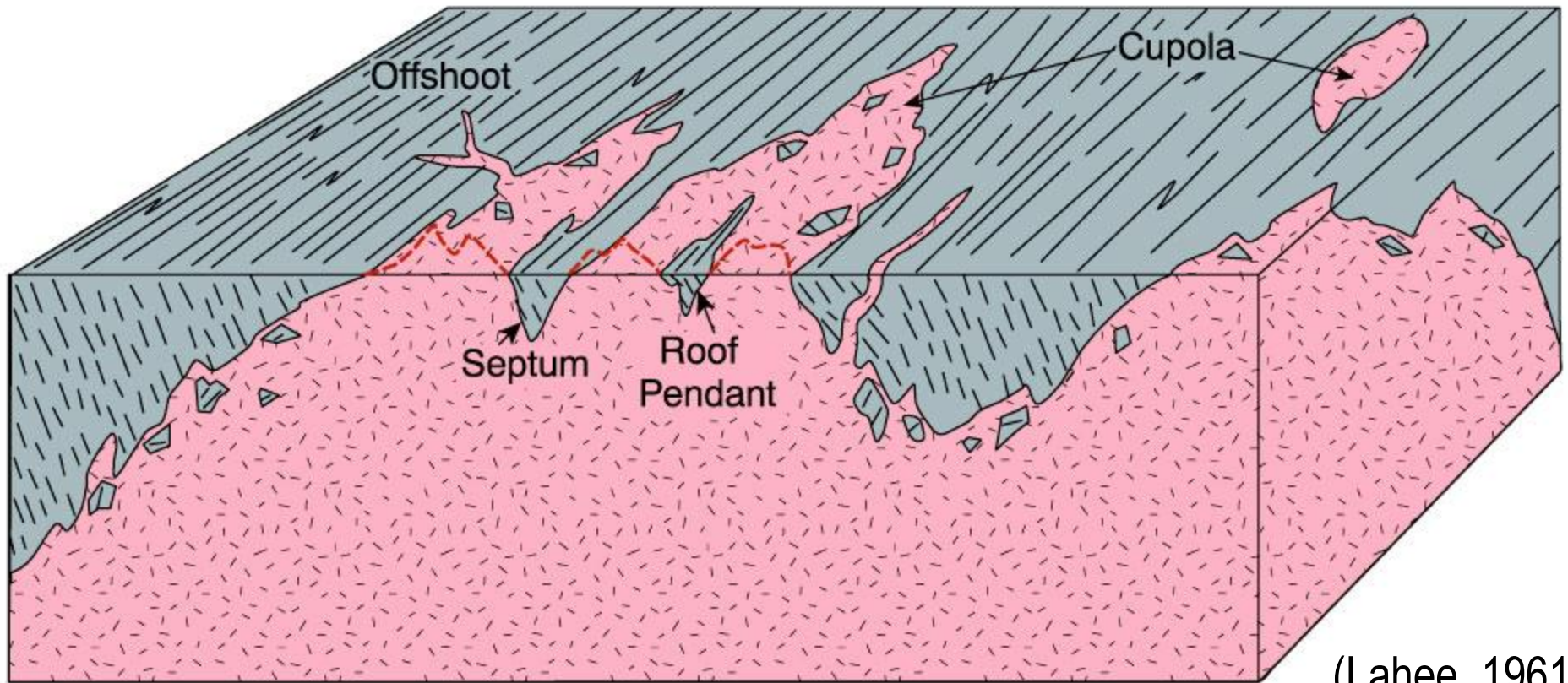


Неплюевский массив гранитоидов. Форма – параллелограмм (связь с разрывами)



Массив автохтонных грантоидов (катазона). Контакты конформны структуре вмещающих пород

Как определить глубину эрозионного среза?

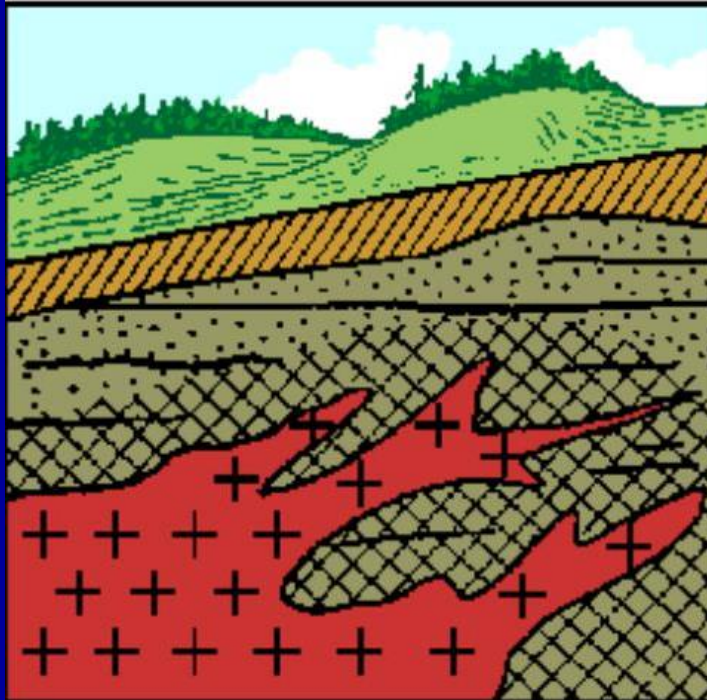


(Lahee, 1961)

1. Ориентировка контакта и прототектонических трещин (L);
2. Характер контакта (апофизы, ксенолиты вмещающих пород)
3. Ориентировка линейности и плоскостных текстур;
4. Степень и характер экзоконтактовых изменений (грейзены, скарны)
5. Развитие пегматитовых жил



Дайка аплитов в
гранодиоритах Тургоякского
массива, Ю. Урал. Фото А.В,
Тевелева



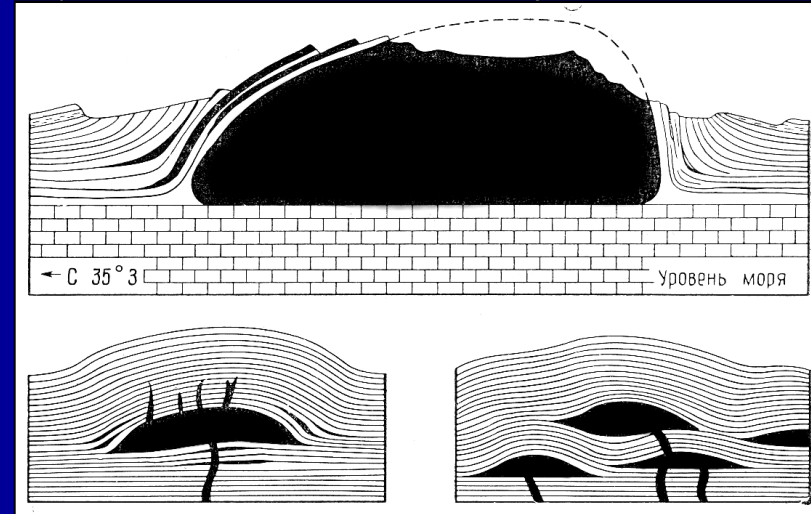
Апофизный
контакт
интрузии. По А.К.
Корсакову

Пологие L-трещины в апикальной части Степнинского
массива гранитоидов. Фото А.В. Тевелева

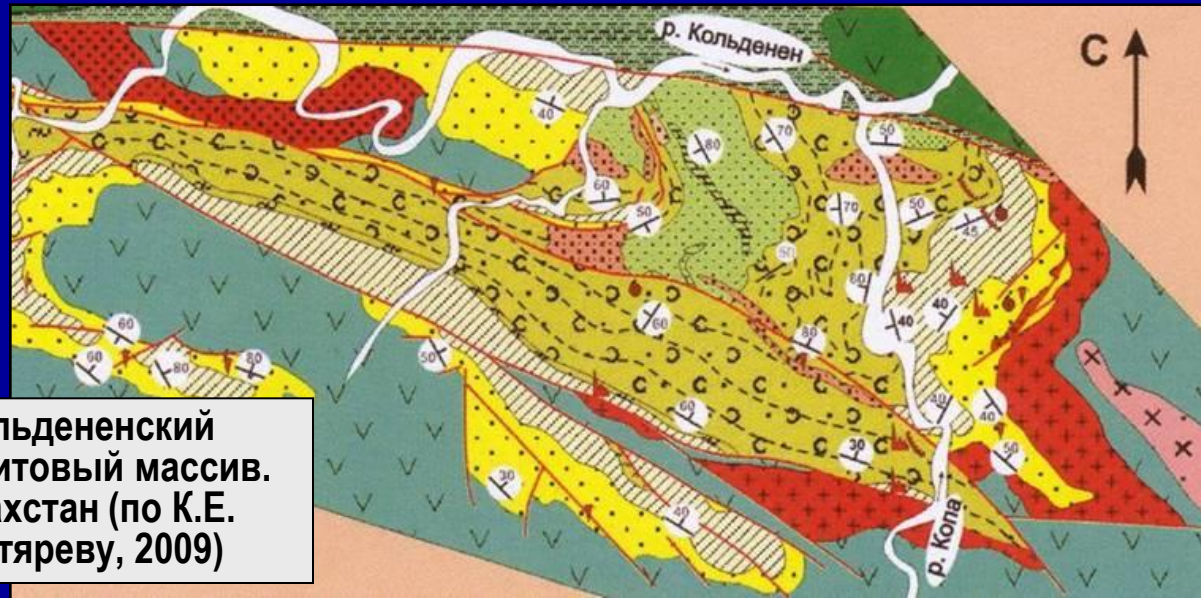


1. Предкинематические массивы (доскладчатые)

- Спокойная тектоническая обстановка (внутриплитные)
- Интрузивы с «активным» внедрением;
- Силлы, лакколиты, лополиты;
- Иногда неотличимы от синкинематических массивов;
- Распространены гнейсовидные текстуры;
- Смещение по разрывным нарушениям



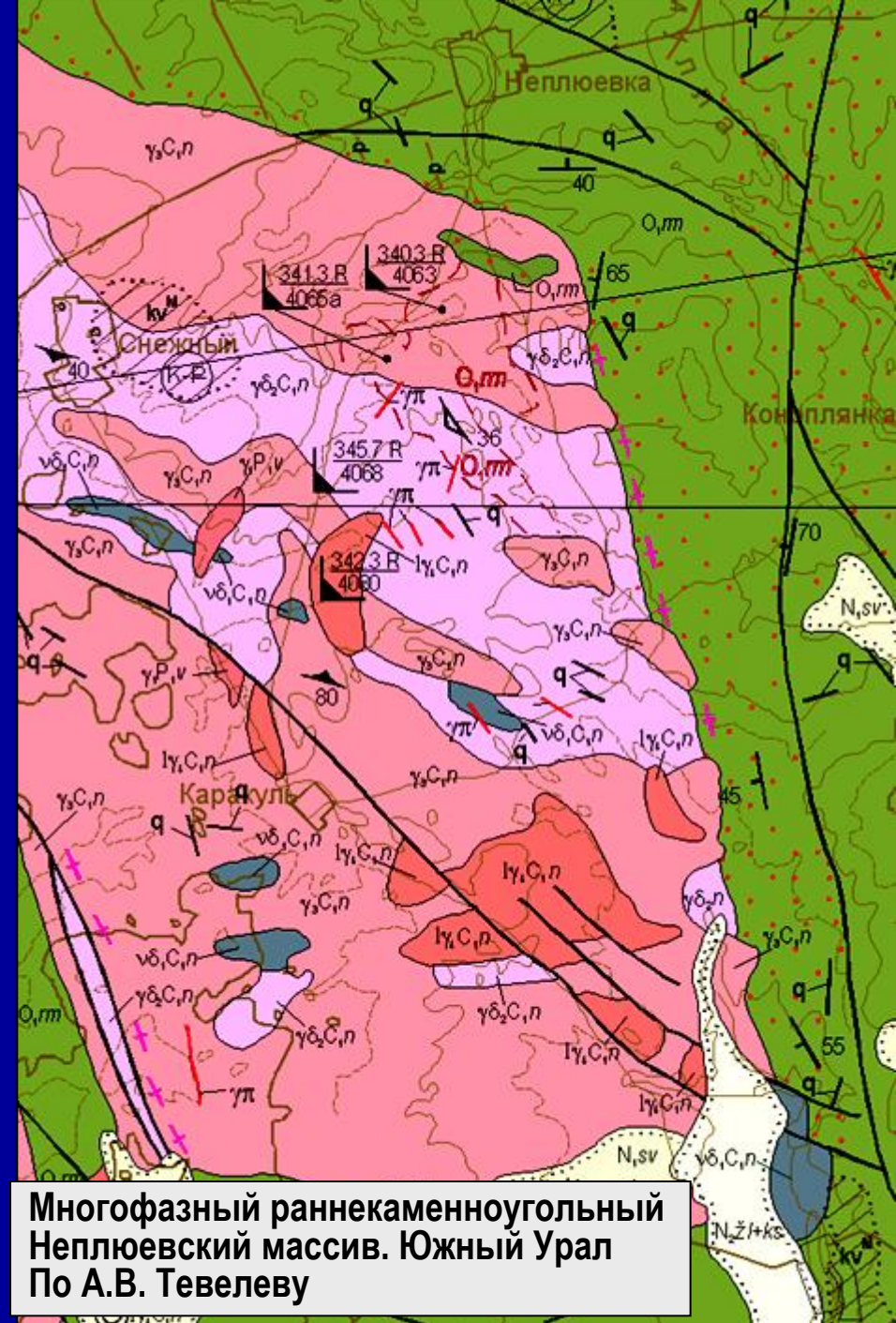
Лакколиты по М.П. Биллингсу
(Из учебника А.Е. Михайлова, 1984)



Кольдененский
тоналитовый массив.
Казахстан (по К.Е.
Дегтяреву, 2009)

2. Синкинематические массивы

- Формируются в активной тектонической обстановке
- Морфология часто определяется приуроченностью к разрывным нарушениям;
- В приконтактных зонах – следы тектонических движений (зеркала скольжения, будинаж, рассланцевание);
- Гнейсовидные текстуры

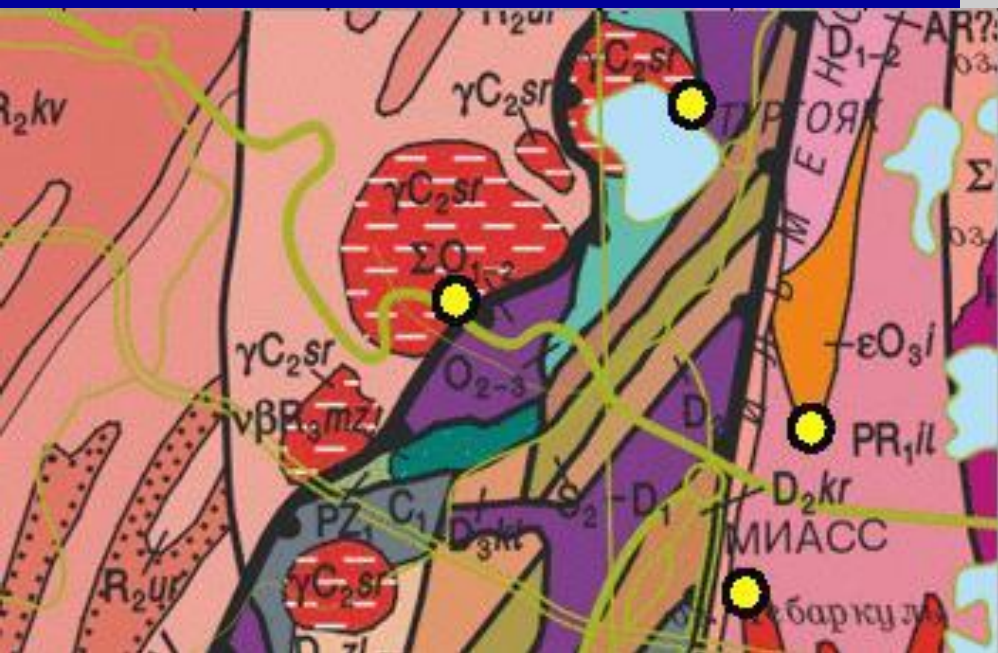


Приконтактовая гнейсовидность синкинематических плутонов



3. Посткинematические массивы

- Резко секущее положение в структуре складчатой области;
- «Запечатывание» разрывных нарушений;
- Изометричная форма;
- Преобладание массивных текстур



Сыростанский и Тургойакский массивы гранитоидов;
Южный Урал (по Борисенко и др., 2001)

Внутреннее строение плутонов: фазы и фации

Плутоническая фаза – часть плутонического комплекса, совокупность отдельных однородных тел, сложенных однотипными или близкими породами устойчивого (или непрерывного плавно меняющегося) состава и структуры. Фаза соответствует самостоятельному этапу внедрения и отделяется от других **последовательно образующихся фаз интрузивными границами**.

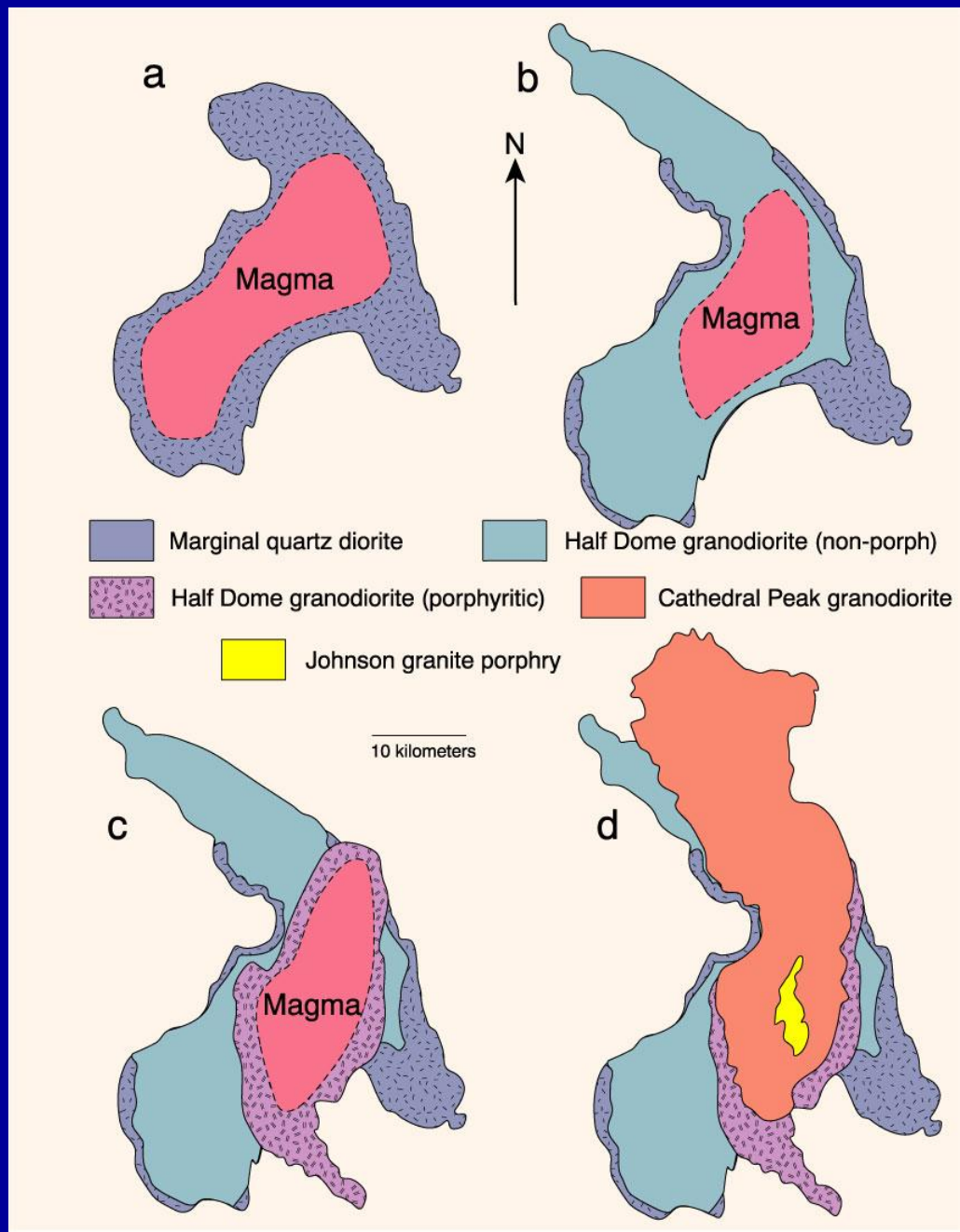
Плутоническая фация – часть плутонической фазы или комплекса в целом, характеризующаяся однородностью структурно-вещественных признаков и отличающаяся по этим признакам от других **синхронно образующихся частей** и отделяющаяся от них **фациальными (постепенными) границами**

Типы аллохтонных массивов (по сложности строения)

- **Простые однофазные** – образованы в результате одноактного внедрения магмы, имеют более или менее однородный состав и строение
- **Дифференцированные однофазные** – образованы в результате одноактного внедрения магмы, но имеют значительные структурно-вещественные неоднородности (за счет кристаллизационной дифференциации, ликвации и т.д.)
- **Сложные многофазные** – образованы в результате нескольких последовательных внедрений порций магмы близкого или различного состава, породы разных фаз внедрения имеют друг с другом интрузивные контакты
- **Сложные полигенные и полихронные** – образованы в результате неоднократного внедрения порций магмы, часто со значительными интервалами во времени; в их составе участвуют породы двух или более плутонических комплексов, часто относящихся даже к разным магматическим формациям и разным тектоническим циклам

Интрузивные фазы и фракции

Последовательность
внедрения фаз
плутона Туолумне,
Сев. Америка



Определение последовательности внедрения интрузивных фаз

1. Зоны закалки
2. Ксенолиты
3. Апофизы
4. Прорывание контактов, текстур и т.д.
5. Зоны лейкократизации
6. Экзоконтактовые изменения

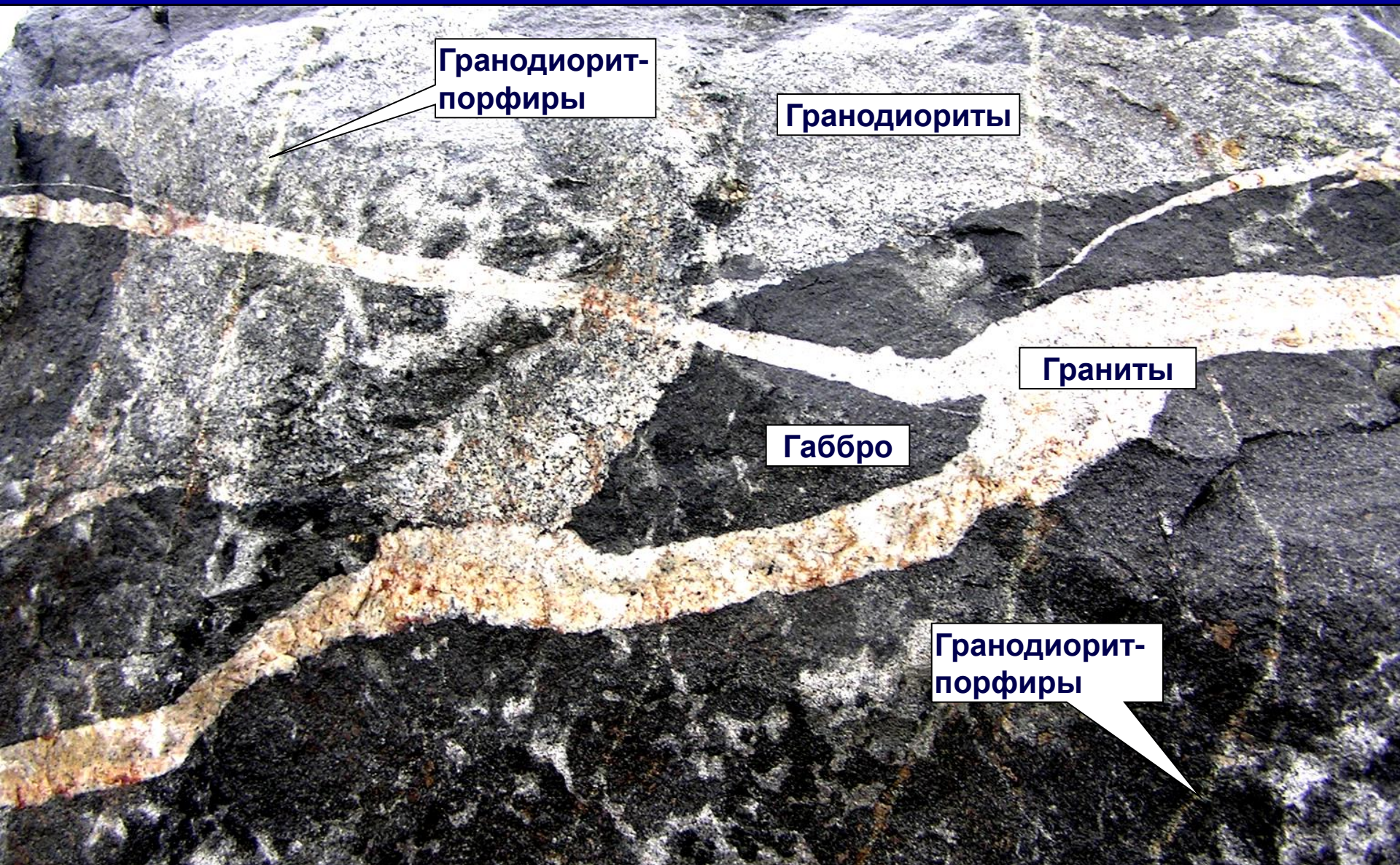
Ксенолиты габбро в гранитах.
Фото А.В. Тевелева



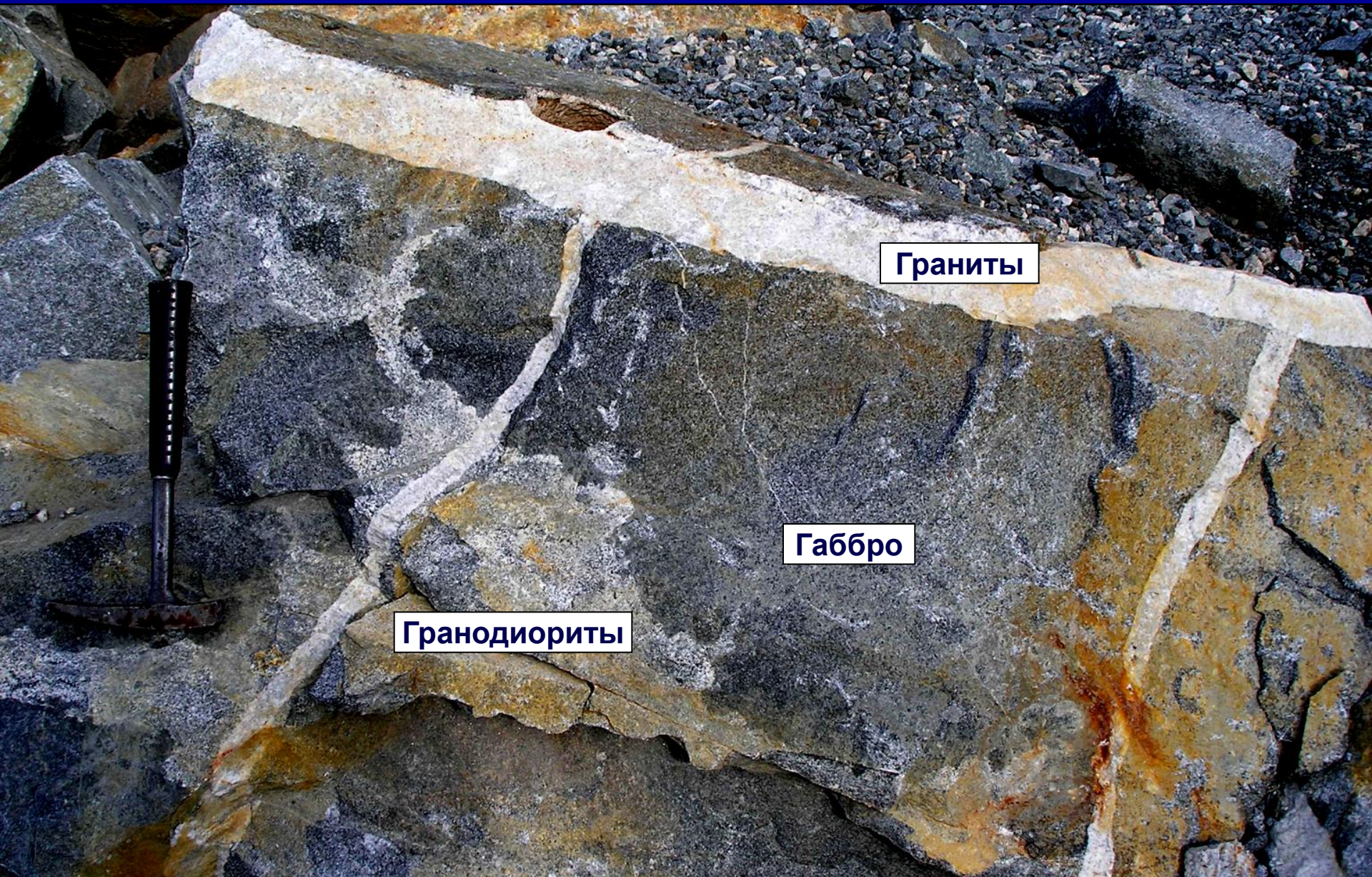
Взаимоотношения интрузивных фаз Сыростанского массива, Ю. Урал. Зона лейкократизации в эндоконтакте



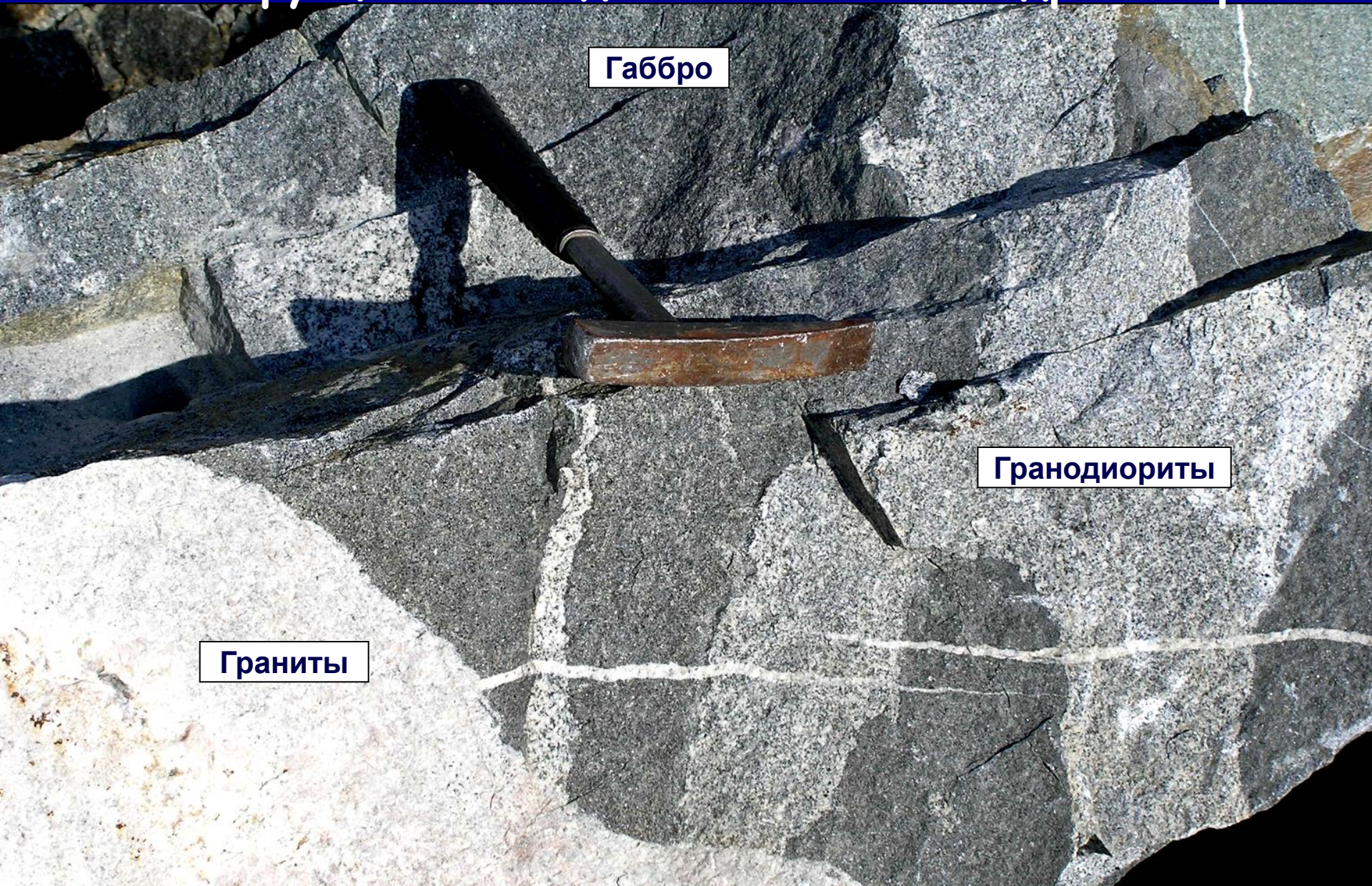
Реконструкция последовательности внедрения фаз



Реконструкция последовательности внедрения фаз



Реконструкция последовательности внедрения фаз



Габбро

Гранодиориты

Граниты

Следы субсинхронного внедрения контрастных по составу магм



Меланократовые включения
в гранодиоритах
Сыростанского плутона
(Южный Урал)

Следы субсинхронного внедрения контрастных по составу магм



Меланократовые включения
в граносиенитах
Бердяушского плутона
(Южный Урал)

Первичные ориентированные структуры в аллохтонных массивах гранитоидов

Первичные ориентированные структуры в интрузивных массивах объединяются термином "**прототектоника**". Под этим термином понимают структурные элементы, возникшие непосредственно при формировании массива, то есть до того, как они начали изменяться под воздействием внешних сил.

Ориентированные структуры в плутонических массивах делятся на две большие группы:

- 1) **прототектоника жидкой фазы**,
- 2) **прототектоника твердой фазы**.

Прототектоника жидкой фазы – структурные/текстурные элементы, обусловленные течением магмы непосредственно в процессе образования массива.

Прототектоника твердой фазы – структурные элементы, возникшие в отвердевшем массиве при его остывании. Их формирование связано, главным образом, с **контракцией**, то есть с уменьшением объема вещества при остывании.



Параллельные текстуры течения в гранитах, выраженные в ориентировке фенокристов полевого шпата и ксенолитов габбро.
Облицовка подъезда Главного Здания МГУ.

Из материалов Ал.В.Тевелева

Протектоника твердой фазы

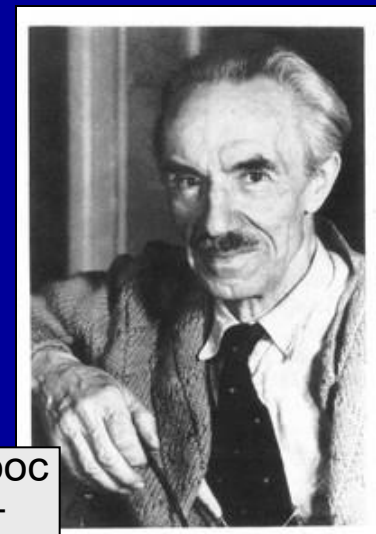
Поперечные трещины (**Q**) – ориентированы перпендикулярно линейности (**F**)

Продольные трещины (**S**) – ориентированы параллельно линейности (**F**)

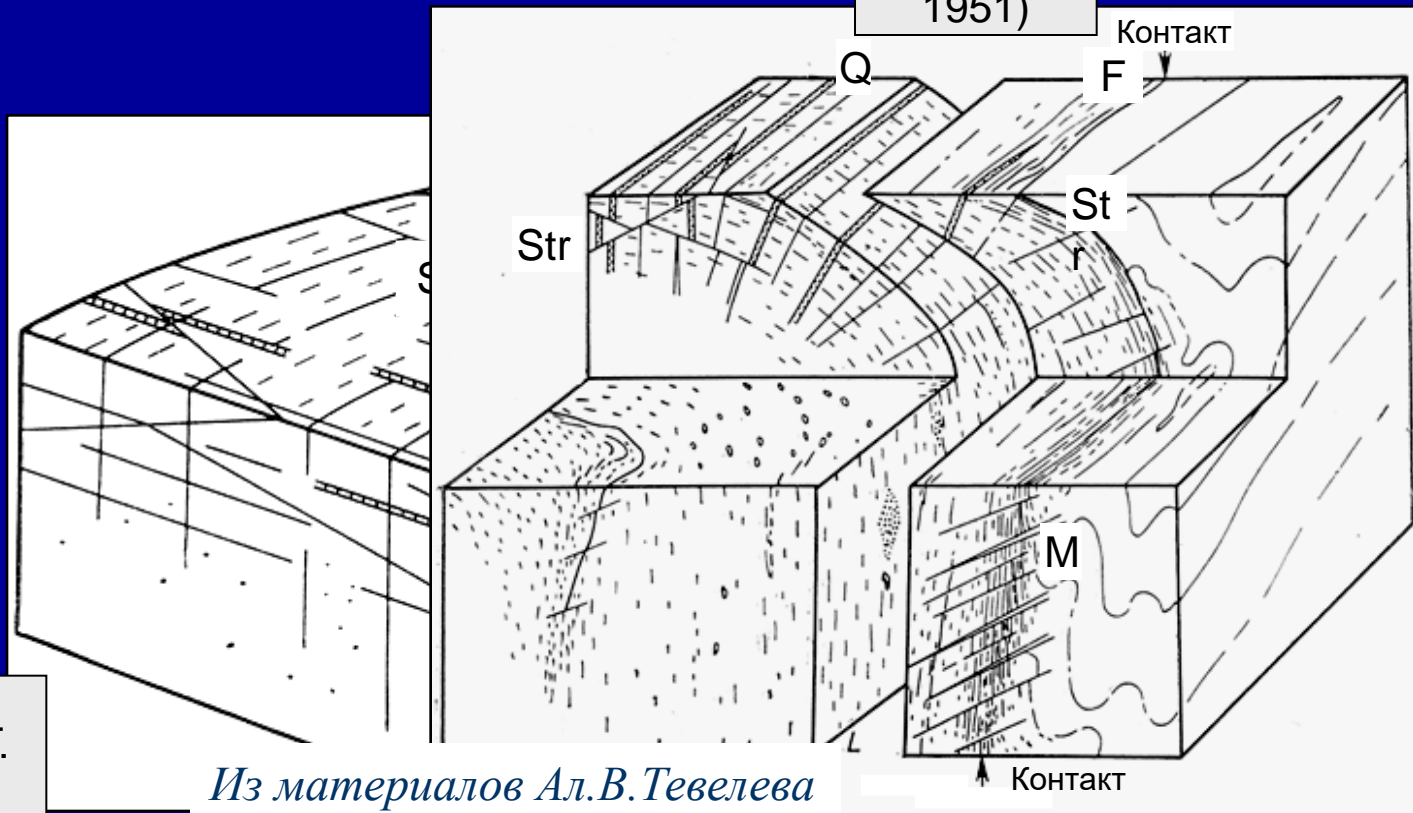
"Пластовые" трещины (**L**) – ориентированы параллельно контакту и поверхностям течения, ортогонально к поперечным и продольным.

Диагональные трещины (**Str**) – ориентированы косо к линейности (**F**), обычно это **СКОЛЫ**.

Краевые трещины (**M**) – иногда появляются в эндоконтактах массива, располагаются под углом к линейности и падают ($\angle 20-40^\circ$) вглубь массива.



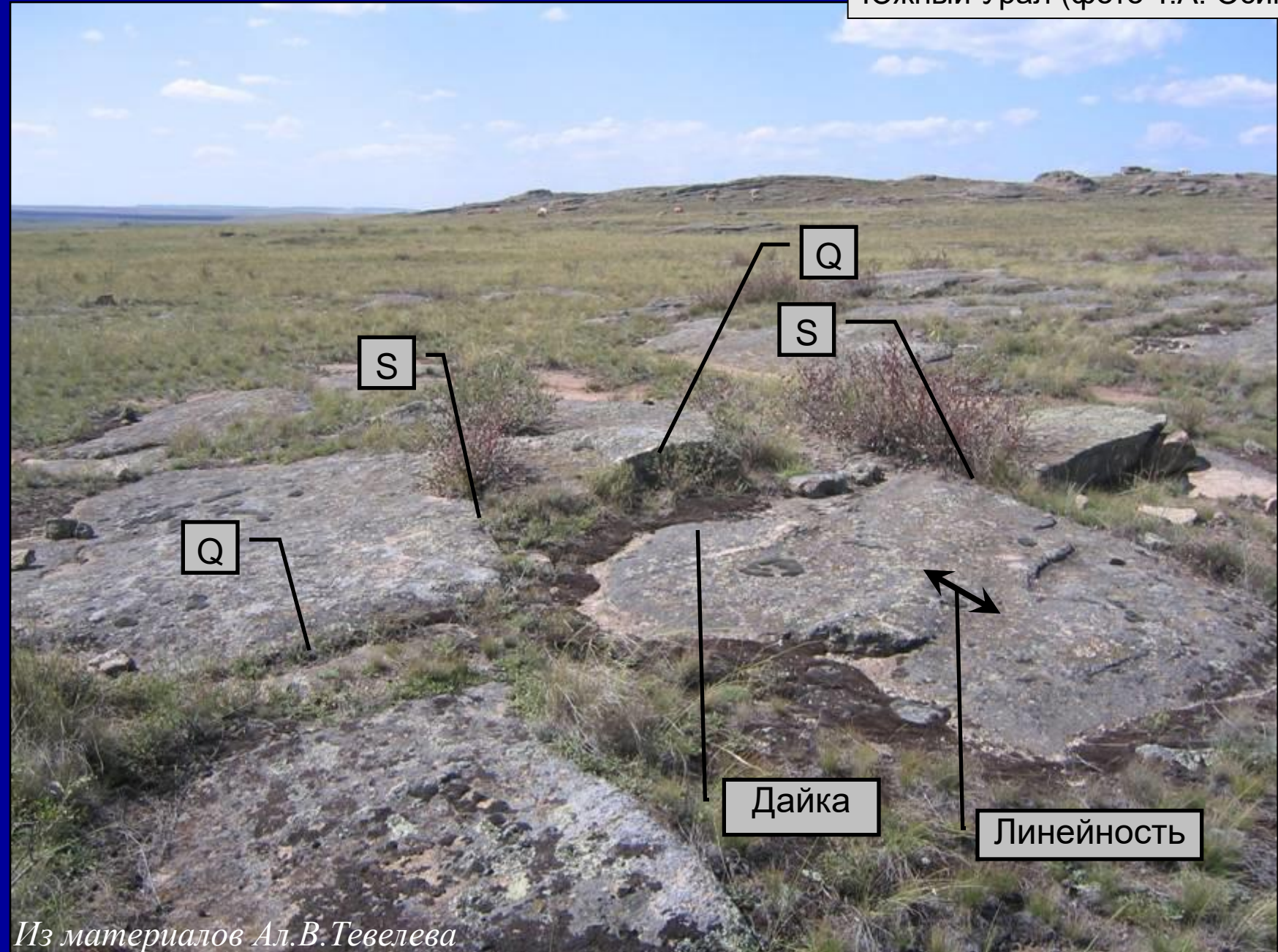
Ганс Клоос
(1885–
1951)



Главные системы трещин в батолите, по Г. Клоосу

Из материалов Ал.В.Тевелева

S- и Q-трещины в биотитовых
гранитах. Суундукский массив.
Южный Урал (фото Т.А. Осиповой)



S

Q

S

Q

Дайка

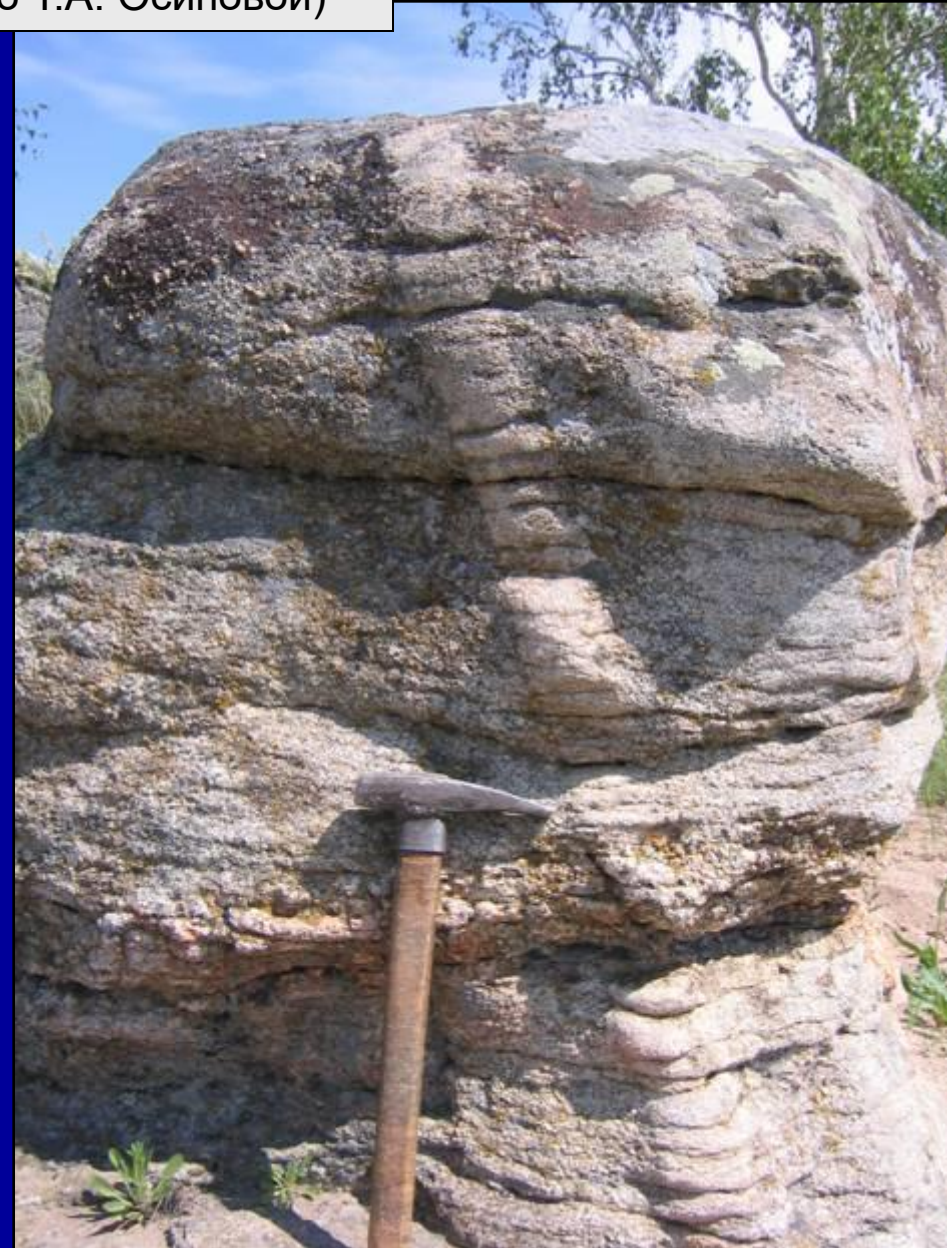
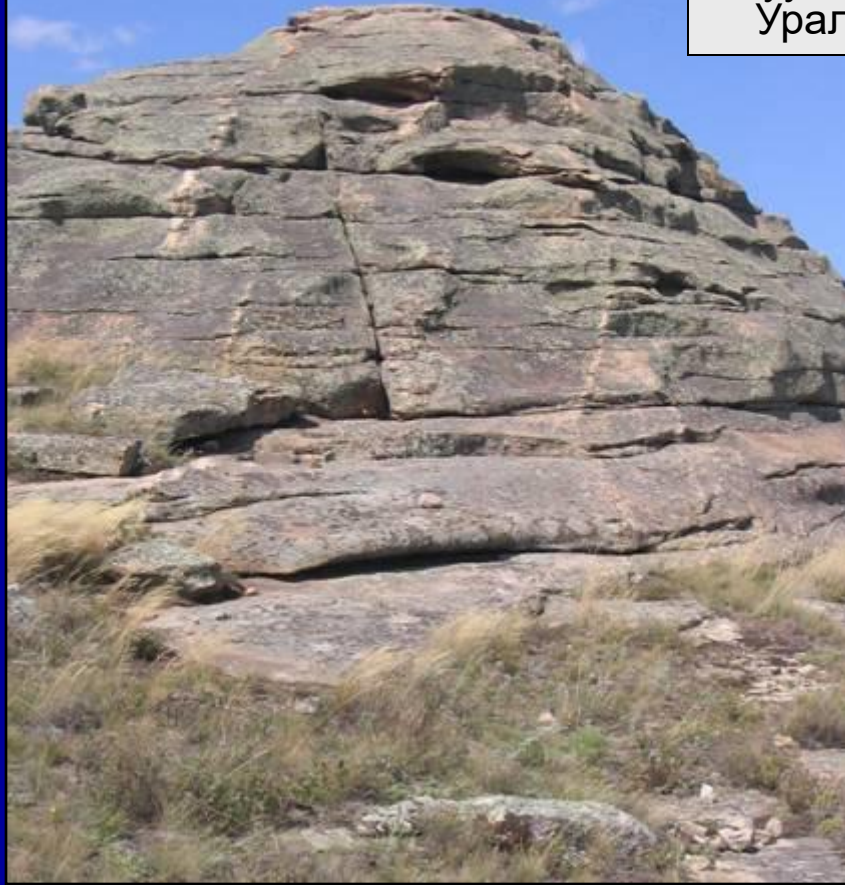
Линейность

Из материалов Ал.В.Тевелева

*Прототектонические трещины в протерозойских гранитах,
Синайский полуостров*



L-трещины в лейкогранитах.
Суундукский массив. Южный
Урал (фото Т.А. Осиповой)



Прототектонические трещины
формируются на протяжении всего
времени остывания плутона, иногда
пересекая и дайки первого этапа

Из материалов Ал.В.Тевелева

Типичный рисунок ф отоизображения гранитоидных массивов -
следствие широкого распространения прототектонических трещин

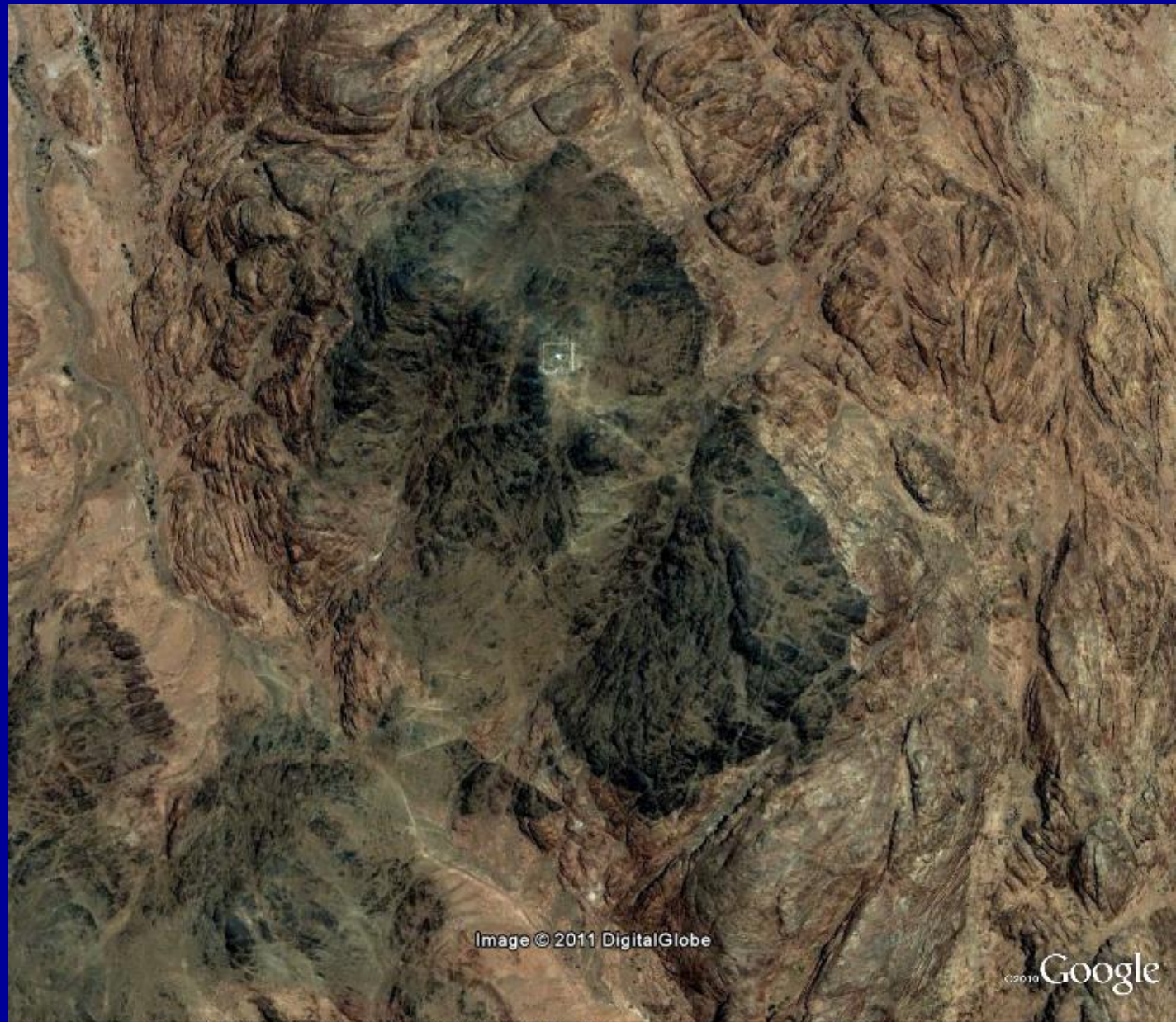


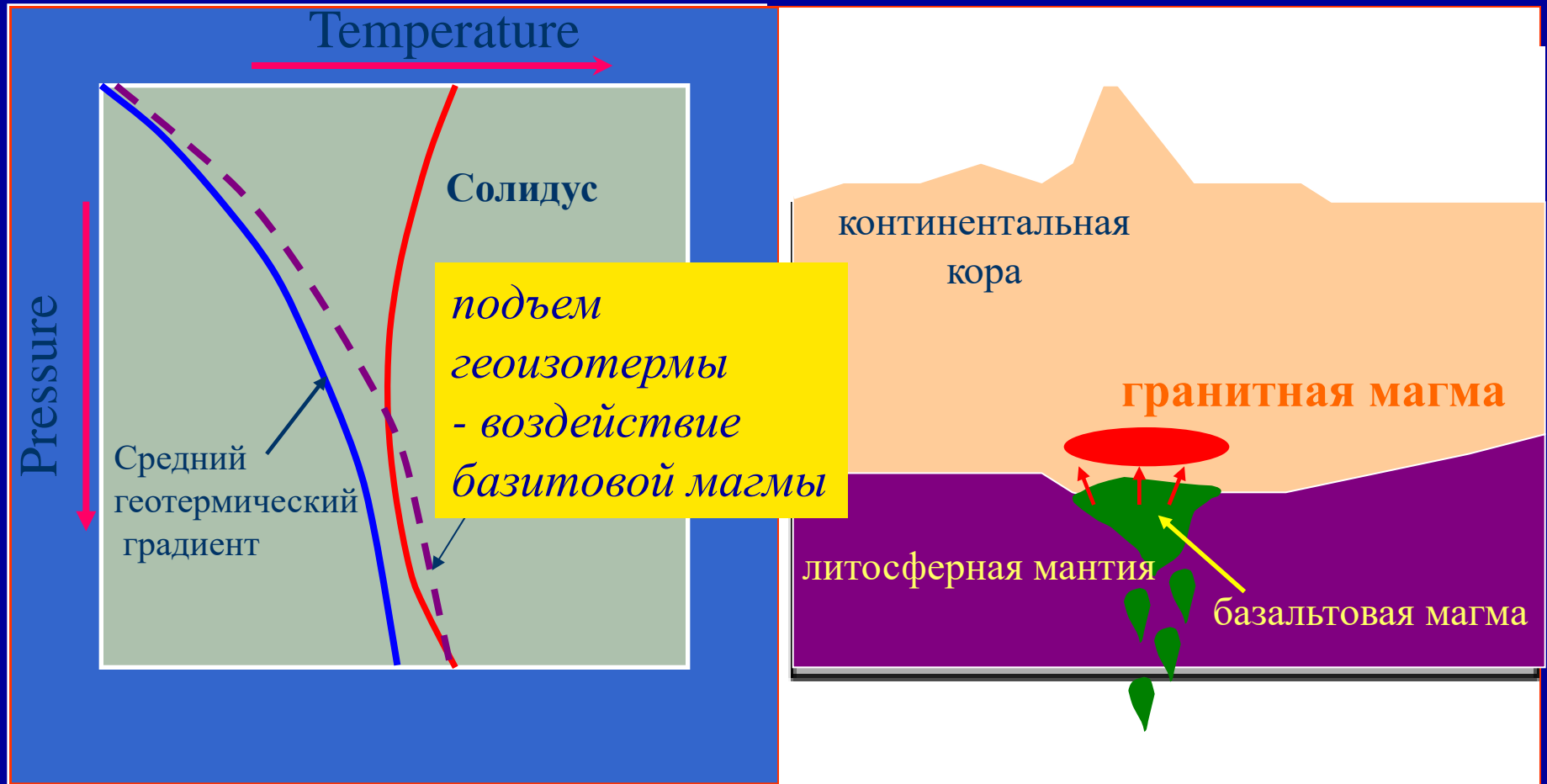
Image © 2011 DigitalGlobe

©2011 Google

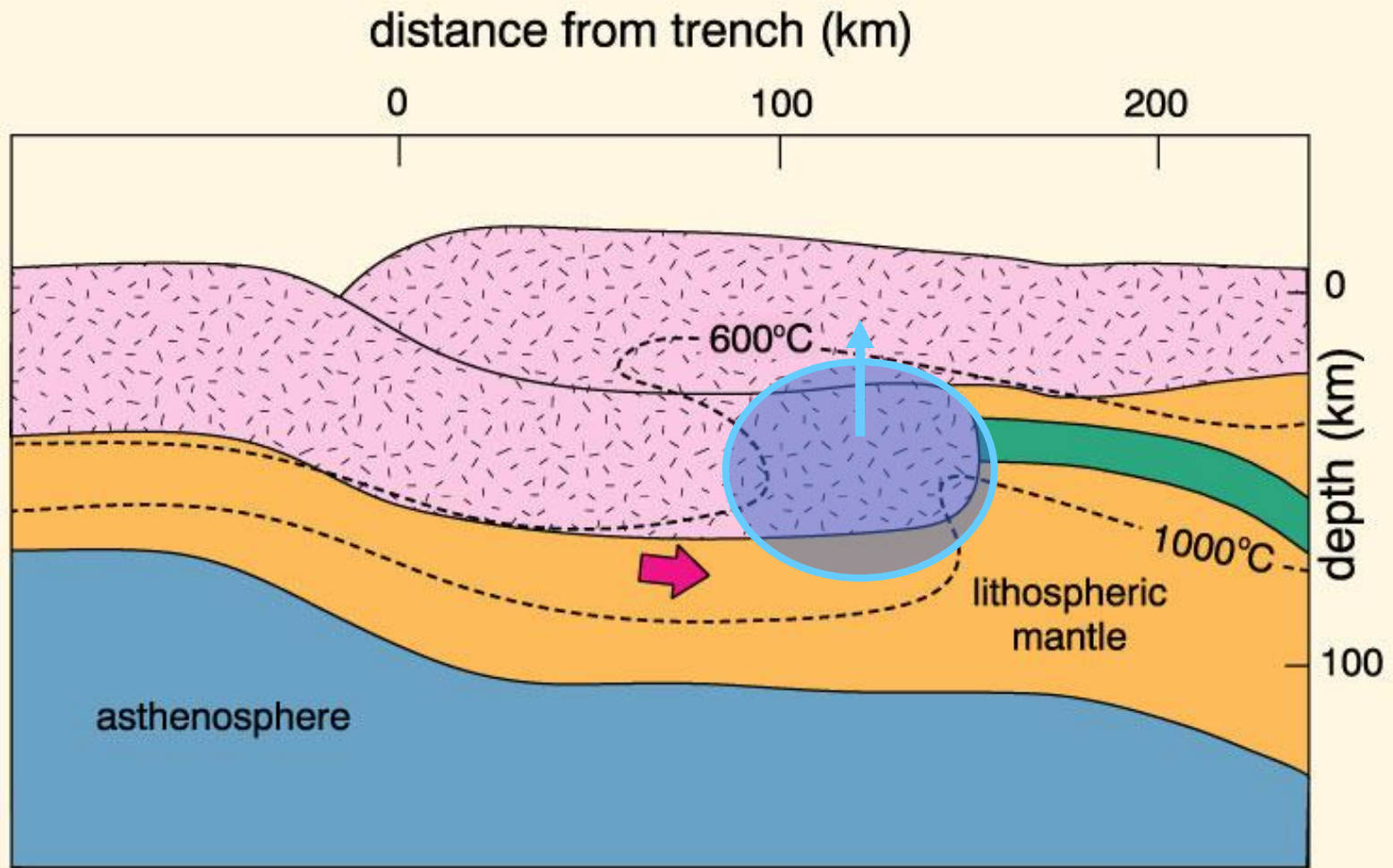
Дата съемки: 11 июн 2005 28°33'28.34" С 33°55'04.28" В Высота над уровнем моря: 7387 фут. Высота камеры над уровнем

Магмогенерация

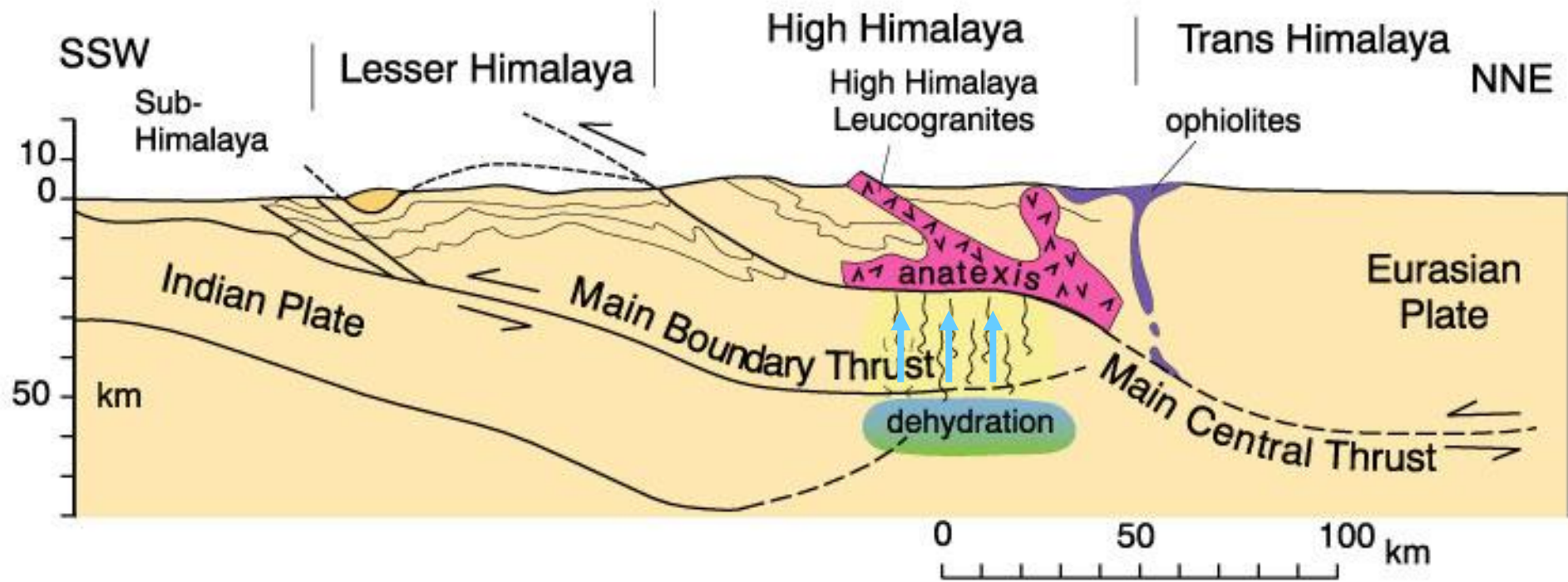
1. Под воздействием мантийных расплавов



2. Подъем коры, испытавшей погружение

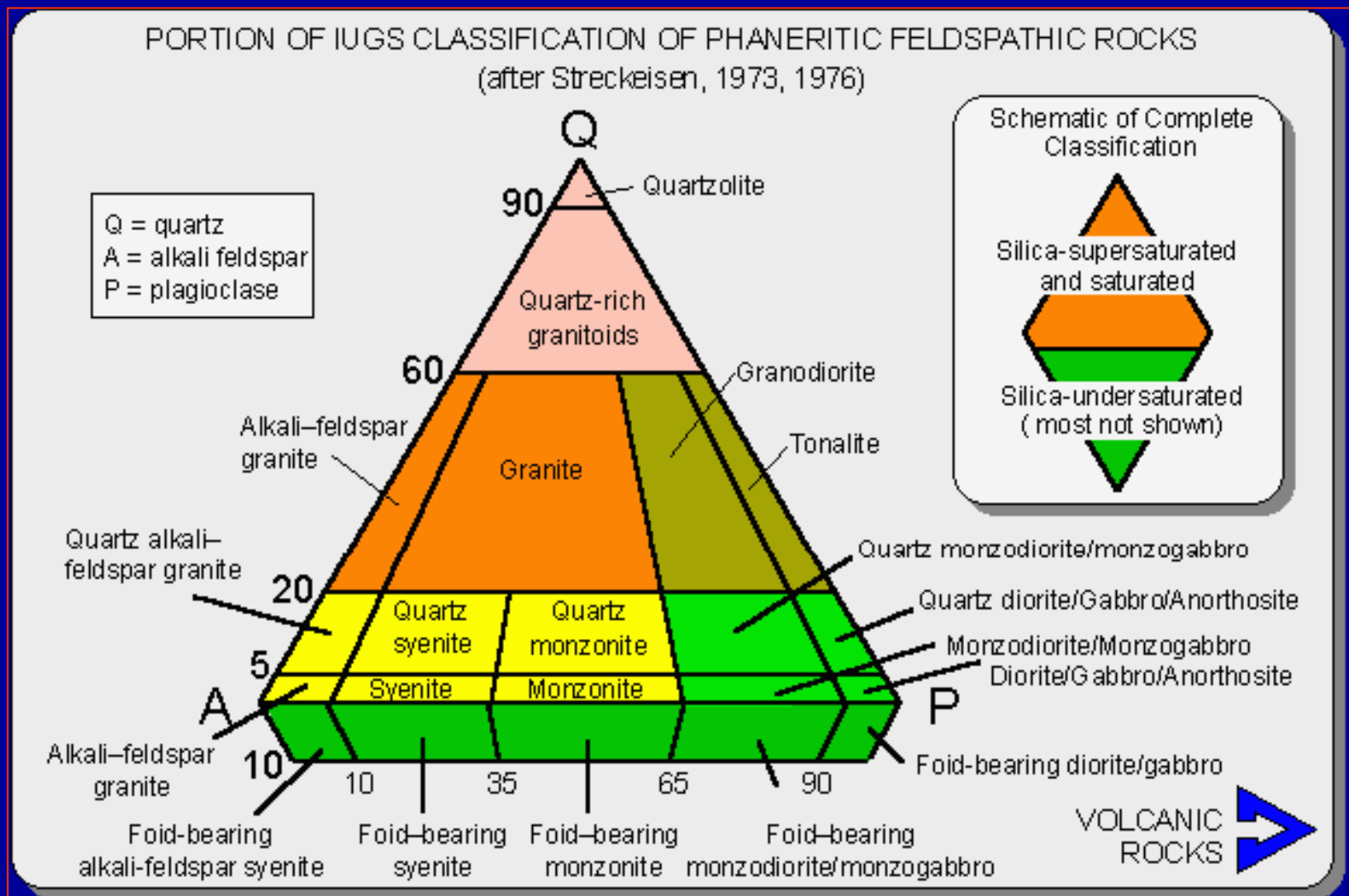


3. Привнос магмофильных летучих (воды)

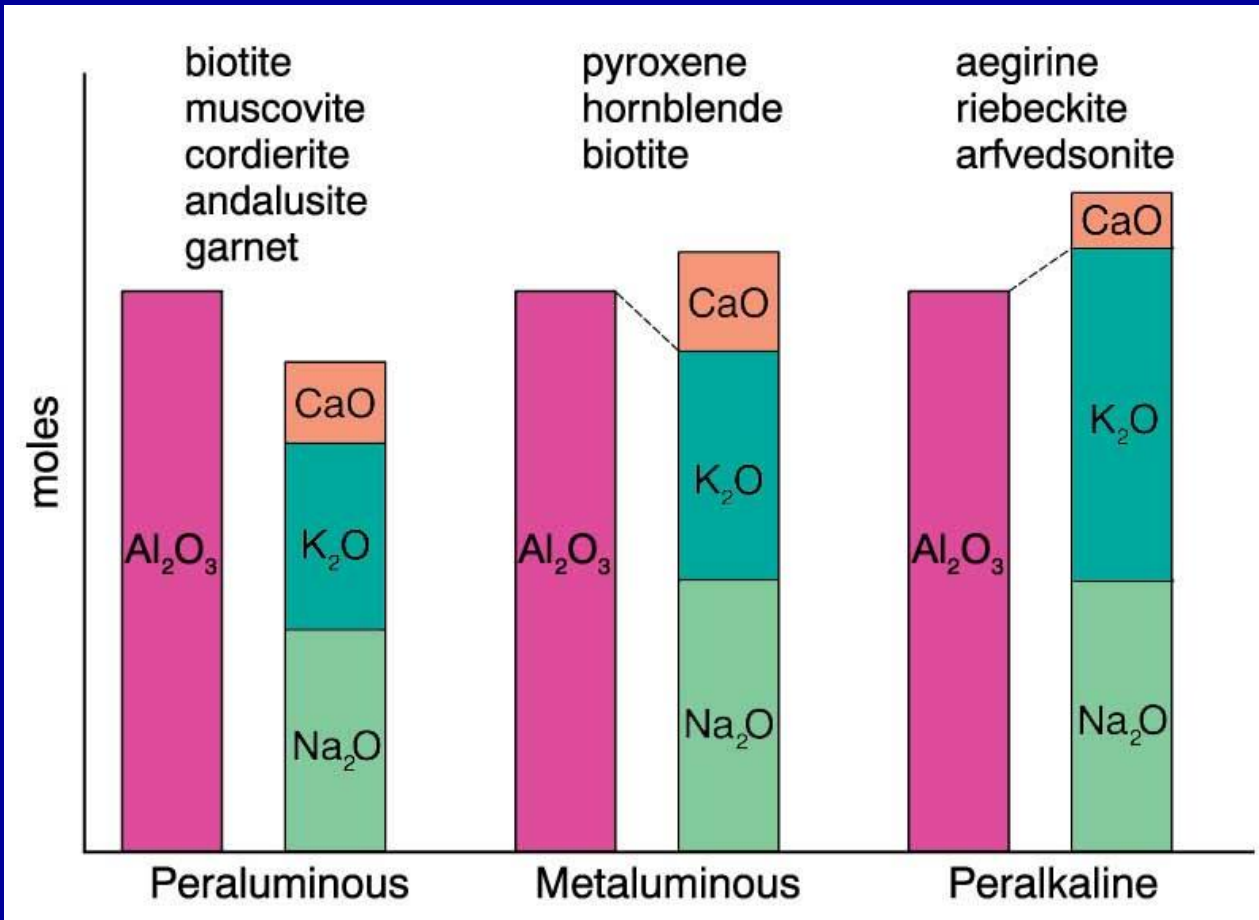


Классификации гранитоидов

минералогическая - по соотношению главных породообразующих минералов



Классификации на петрохимической основе



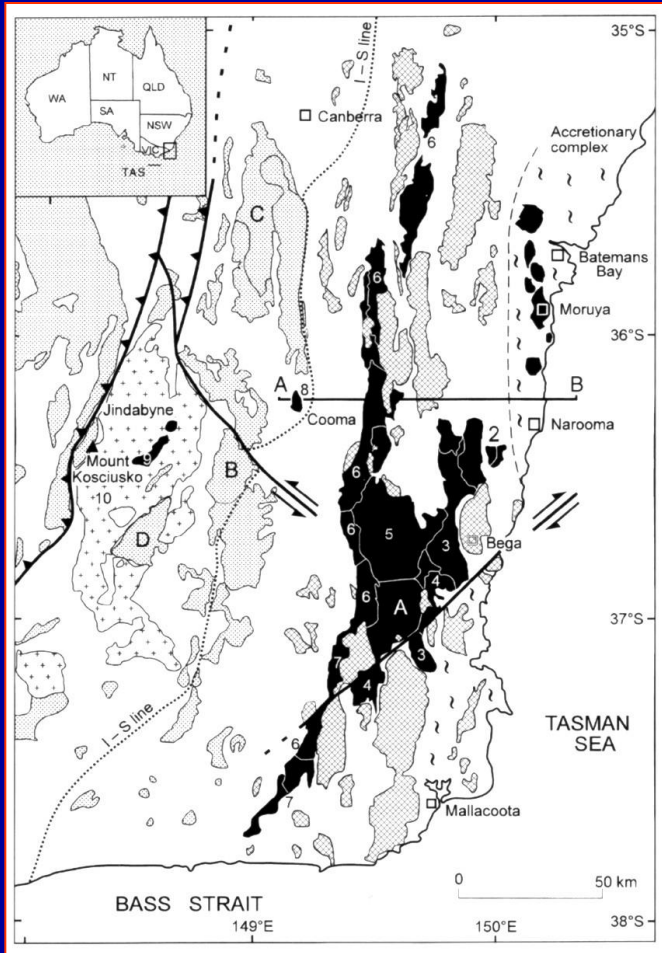
Shand, 1943

Коэффициент насыщения глиноземом $ASI = Al / (K + Na + 2Ca)$

Коэффициент агпаитности $K_{agr} = (Na + K) / Al$

Восточная Австралия

White, Chappell, 1974



S-тип (sedimentary, supracrustal)
I-тип (igneous, infracrustal)

S-граниты - плавление метаосадков

- пересыщение Al_2O_3 ($K_{Al} > 1.05$),
присутствие высокоглиноземистых фаз (gr, and, crd, mu),
повышенные K/Na (Kfs/pl)
высокие $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i > 0.707$
ксенолиты гнейсов и кристаллических сланцев
гранит-лейкогранитные ассоциации

I-граниты - плавление метабазитов

- умеренные содержания Al_2O_3 ($K_{Al} < 1.05$),
Fe-Mg фазы - bt + amp
невысокие K/Na (pl > и >> Kfs)
 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ на уровне 0.704-0.706
меланократовые мелкозернистые включения
габбро-диорит-плагиигранитные ассоциации

накопление новых данных -
необходимость расширения классификации

М-граниты (mantle) - *дифференциаты базальтовых магм*

небольшие объемы

ассоциация с магматитами основного состава

рекордно низкие содержания LILE

мантийные значения $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7025 - 0.7040$

А-граниты (alkaline, anhydrous, anorogenic)

*- производные обогащенных мантийных расплавов,
при переменном участии материала коры*

небольшие объемы

внутриплитные обстановки

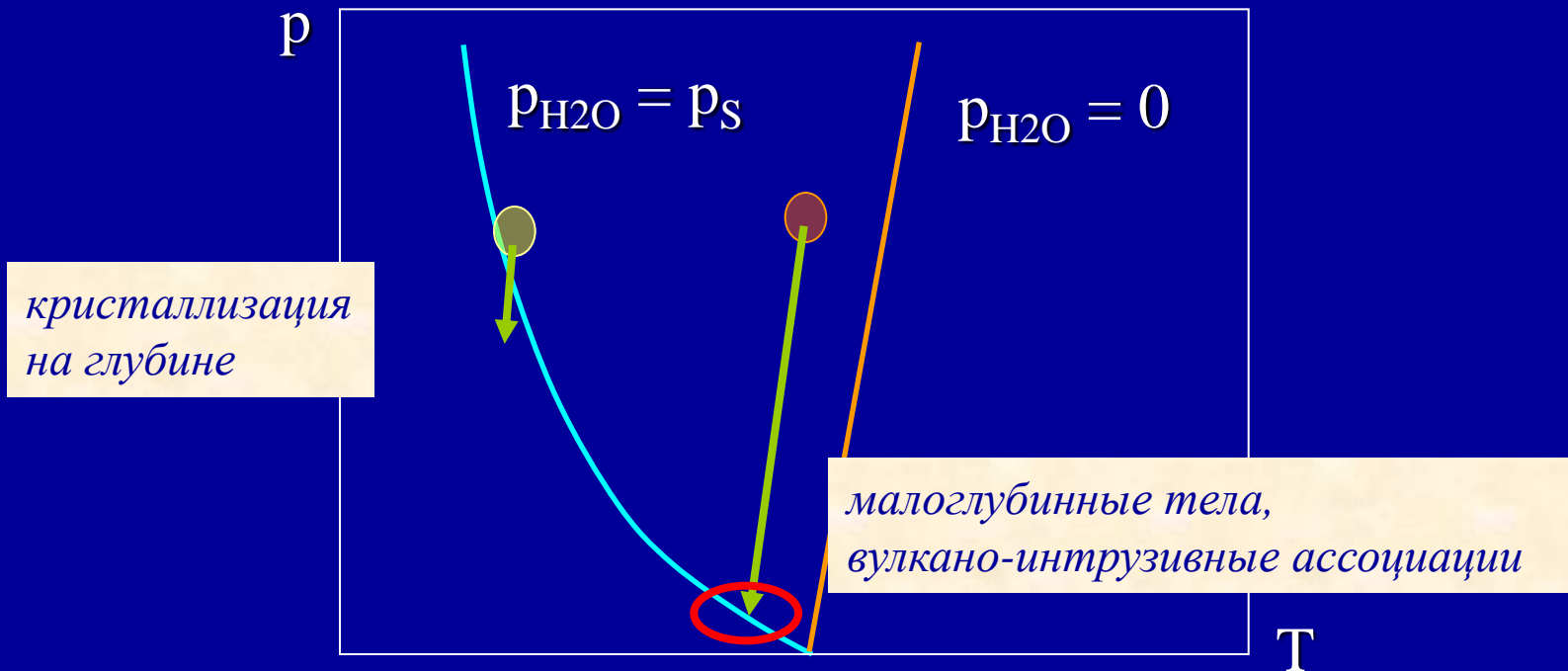
специфический состав (нередко $K_{\text{agp}} > 1$, с rib / arf)

высокие содержания HFSE и всех несовместимых эл-тов

широкий диапазон $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ и прочих геохимических индикаторов

по глубинности становления (Ферштатер, 1987)


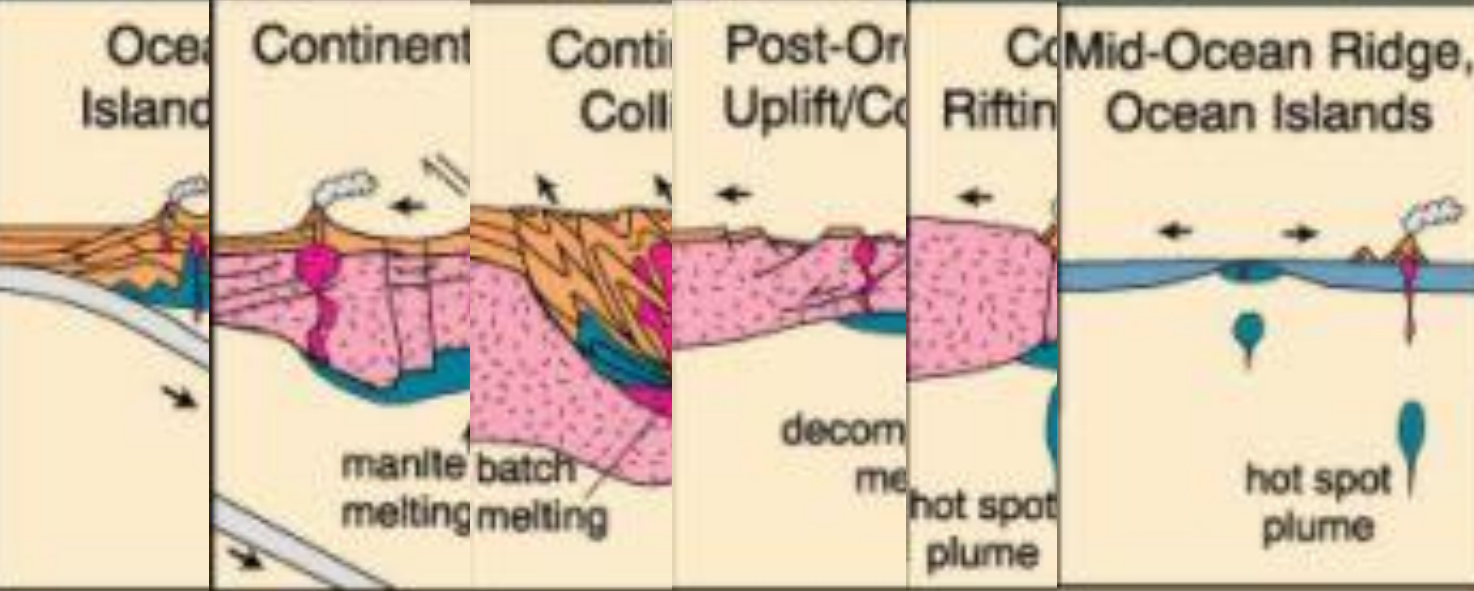
барофильные барофобные



«Сухие» граниты – высокотемпературные, приповерхностные, (M,A);
(частный случай – гиперсольвусные граниты).

«Водные» граниты – низкотемпературные, глубинные, S (частный
случай – двуслюдяные граниты)

Table 18-4. A classification of granitoid rocks based on tectonic setting

	OROGENIC			TRANSITIONAL	ANOROGENIC	
	Oceanic Island Arc	Continental Arc	Continental Collision	Post-Orogenic Uplift/Collapse	Continental Rifting, Hot Spot	Mid-Ocean Ridge, Ocean Islands
						
Associated Volcanism	Island-arc basalt to andesite	Andesite and dacite in great volume	often lacking	basalt and rhyolite	alkali lavas, tuffs, and caldera infill	MORB and ocean island basalt
Classification Barbarin (1990)	T_{IA} tholeiite island arc	H_{CA} hybrid calc-alkaline	C_{ST} C_{CA} C_{CI} continental types	H_{LO} hybrid late orogenic	A alkaline	T_{OR} tholeiite ocean ridge
Pearce <i>et al.</i> (1984)	VAG (volcanic arc granites)		COLG (collision granites)		WPG and ORG (within plate and ocean ridge granites)	
Maniar & Piccoli (1989)	IAG island arc granite	CAG contin. arc granite	CCG cont. collision gran.	POG post-orogenic gran.	RRG CEUG rift & aborted/hotspot	OP ocean plagiogranite
Origin	Partial melting of mantle-derived mafic underplate	PM of mantle-derived mafic underplate + crustal contribution	Partial melting of recycled crustal material	Partial melting of lower crust+ mantle and mid-crust contrib	Partial melting of mantle and/or lower crust (anhydrous)	Partial melting of mantle and fractional crystallization
Melting Mechanism	Subduction energy: transfer of fluids and dissolved species from slab to wedge. Melting of wedge, transfer of heat upward		Tectonic thickening plus radiogenic crustal heat	Crustal heat plus mantle heat (rising asthen. + magmas)	Hot spot and/or adiabatic mantle rise	

After Pitcher (1983, 1993), Barbarin (1990)

Литература по теме

1. Тихомиров В.Г., Журавлев Б.Я., Федоров Т.О. Структурная геология магматических массивов. 1992.
2. Перчук А.Л., Сафонов О.Г., Сазонова Л.В. и др. Основы петрологии магматических и метаморфических процессов. 2015.
3. Winter J.D. Principles of igneous and metamorphic petrology. 2013.
4. Богатиков О.А. Магматические горные породы. Том 4. Кислые и средние породы.
5. Barbarin B. Granitoids: Main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting. Geological Journal, 1990. Vol. 25. 227-238.
6. Chappell, B. W. and White, A. J. R. 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geology, 8, 173-174.