

Складчато-интрузивный орогенез

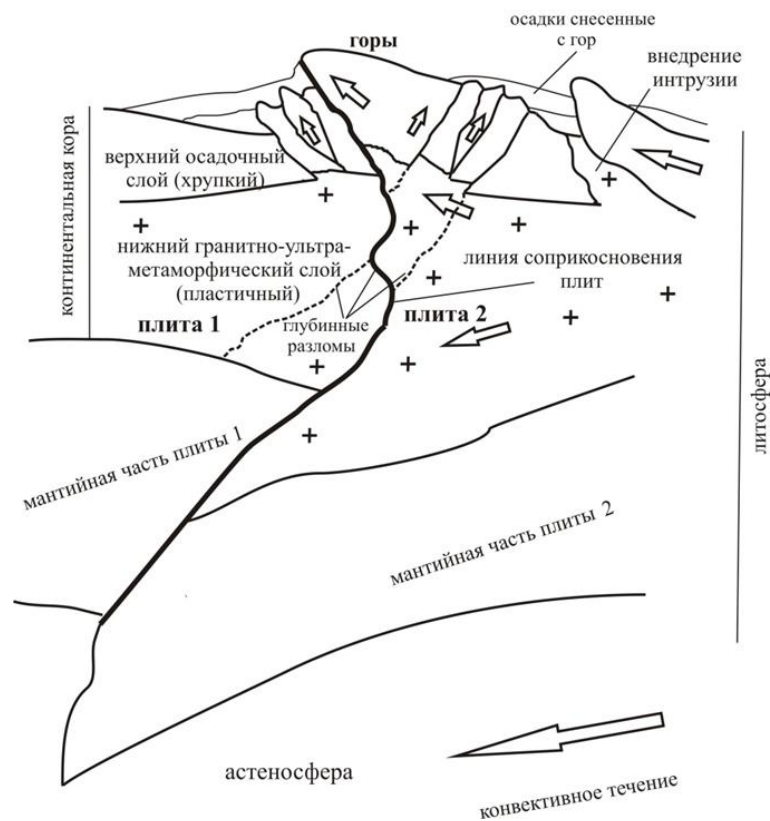
Обзор современного уровня знаний о формировании самых распространенных типов горных сооружений на земных континентах – складчатого и интрузивного

До 21 века геология имела весьма слабое представление о механизмах формирования гор вообще, а о складчато-интрузивных сооружениях земной коры строились умозрительные и зачастую фантастические гипотезы. На рубеже 20-го и 21-го веков геологи пришли в общем виде к непротиворечивому и убедительному пониманию процессов горообразования. Разумеется, геология стоит только в начале пути изучения вопросов орогенеза, то есть вопросов, связанных не только с проблемами формирования гор на поверхности, но и с проблемами конвективных процессов протекающих в литосфере и в подстилающей ее астеносфере.

Земная кора разделена на три слоя с разной способностью к деформации и текучести, то есть с различными реологическими свойствами. Прежде всего по реологическим, а не по петрологическим свойствам отличаются друг от друга слои коры, хотя им и даны условные петрологические названия – нижний базальтовый слой; средний гранулит-амфиболитовый; верхний гранитный. Наименьшей вязкостью (то есть наибольшей пластичностью) в континентальной литосфере обладает мантийная часть мощностью около 200км в областях орогенеза; нижняя и средняя кора (по 20км) менее пластичны, а верхняя кора (около 20км) самая хрупкая часть литосферы.

Конвективные круговороты недр планеты также имеют многоярусное строение. В частично жидкой астеносфере конвективные потоки образуют сложную и, пока, малопонятную систему течений с круговоротами, которые при достаточно высокой температуре инициируют конвективные движения масс в мантийной литосфере. Пришедшая в движение литосферная мантия в свою очередь разогревает земную кору, где возникает своя система конвекции.

Под действием астеносферной конвекции возникают напряжения в литосфере с перемещениями и коллизиями литосферных плит, сопровождающиеся деформацией земной коры с погружением одной плиты под другую. При этом коровый слой надвигающейся плиты полностью или частично срезается с нагромождением срезаемых толщ, а мантийный слой погружается под противостоящую плиту.



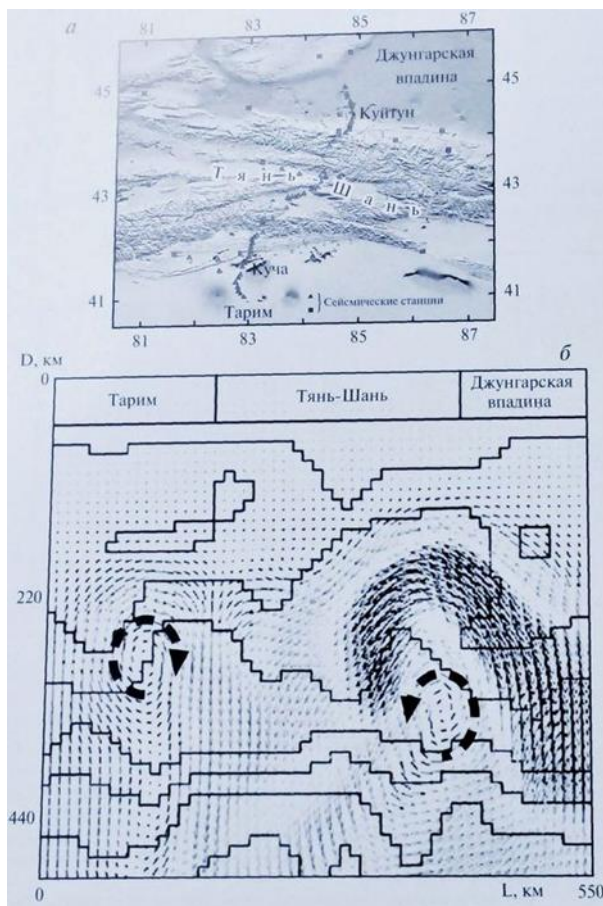
Коллизия литосферных плит. Бабкин А.Г.

В области складчато-интрузивного орогенеза мощность литосферы увеличивается не только за счет деформации, но и за счет притока мантийного вещества из астеносферы в мантийную часть литосферы и в земную кору. В коре приток мантийного вещества выражается не только в виде флюидных потоков и интрузий, но и в виде эффузий – то есть внедрения магмы в верхнюю кору вплоть до излияния лав на дневную поверхность. Так, например, в Тибете известны излияния базальтовых лав в четвертичное время. Кроме того, разогретое под действием конвективных потоков мантийное вещество литосферы разуплотняется, приобретая слегка «набухший» вид.

Вследствие **изостазии**, при которой менее плотная литосфера (средняя плотность $2,8 \text{ г/см}^3$) плавает в более плотной астеносфере (средняя плотность $3,3 \text{ г/см}^3$), зоны орогенеза погружаются в астеносферу, образуя так называемые «**корни гор**» и одновременно (в меньшей степени по сравнению с погружением) приподнимаются на поверхности Земли.

Исходя из вышесказанного: **складчато-интрузивное горообразование является следствием структурной трансформации литосферы, а деформация верхней коры с образованием горного ландшафта – это поверхностное и конечное следствие этих трансформаций.**

Внутриплитный орогенез на большом удалении от зоны коллизии имеет значительные отличия от процессов горообразования возникших непосредственно на линии коллизионного контакта плит.



Сейсмический профиль, основанный на плотностных аномалиях, проведенный через Восточный Тянь-Шань по линии Куча – Куйтун. Стрелки показывают направление астеносферной конвекции (по-видимому, мощность слоя астеносферы весьма неравномерна). D – глубина; L – расстояние вдоль профиля. Liu J. 2007

Под влиянием конвективного течения астеносферы в мантийной литосфере инициируются перемещения масс горных пород в виде круговоротов с параллельным астеносферному течению направлением потоков. Сначала формируется один круговорот. Затем, через десятки и сотни тысяч лет, образуется следующий круговорот встречный первому: так в мантийной литосфере формируется парная валиковая система конвекции различной продольной и поперечной протяженности, при этом флюидальные газово-жидкие потоки этого мантийного круговорота захватывают нижнюю кору. Затем над конвективным круговоротом мантии с некоторой задержкой формируется парная система встречных круговоротов в средней коре. Вещество средней коры не совершает полный оборот в отличие от вещества мантии, а только начинает движение. Дальнейшему конвективному движению в земной коре препятствует жесткость коры, в результате чего наступает некоторый предел деформации и перемещения масс блокируются. Иначе говоря – конвекция в коре только начинает движение, но полный цикл круговорота пород как в мантии не происходит из-за

повышенной жесткости корового вещества. Однако и мантийное вещество литосферы не обязательно совершает полный цикл обращения в конвективном круговороте.

Таким образом, **в месте встречи коровых конвективных течений образуется горный хребет с соответствующим утолщением в средней коре.** Данная схема является упрощенной и, в значительной мере предположительной. Реальная система конвекции в литосфере до сих пор остается во многом не ясной.

Внутреннее глубинное строение горных областей обусловлено направлением конвективных круговоротов и реологией литосферы – **крупнейшим горным впадинам на поверхности соответствуют поднятия в мантийной литосфере, а горным поднятиям – мантийные впадины.** Так, под Тянь-Шанем выявлена волнообразная геометрия границы коры и мантии с амплитудой до 20км, зеркально отражающая неровности земной поверхности: горные поднятия отвечают прогибам мантии, а внутригорные впадины – ее подъемам.

Такое строение земной коры и верхней мантии обязано не только горизонтальному сжатию и деформации, но и процессам, которые связаны с **вещественными преобразованиями и течением глубинного вещества.** Преобразование включает в себя полное или частичное плавление и метаморфизм горных пород, которые сопровождаются увеличением объема и уменьшением плотности мантийного, ниже- и средне-корового вещества. **В месте подъема восходящего мантийного потока кровля литосферной мантии приподнимается не только за счет физического нагнетания масс, но и за счет разуплотнения мантийного вещества. В месте схождения потоков мантия вдавливаются.**

В целом увеличение мощности литосферы в областях орогенеза большей частью происходит за счет увеличения объема мантийной части литосферы, вызванное разуплотнением, а также нагнетанием вещества из нижележащей астеносферы.

Через некоторое время (десятки тысяч лет?) над областью подъема мантии происходит разогрев земной коры с образованием собственной полукруговой валиковой системы конвекции в среднем слое коры. В месте расхождения восходящих среднекоровых конвективных течений кора утоняется с образованием на поверхности Земли межгорной впадины. В месте схождения среднекоровых течений кора скучивается с образованием горного хребта.

Предполагаемая схема конвекции в области орогенеза

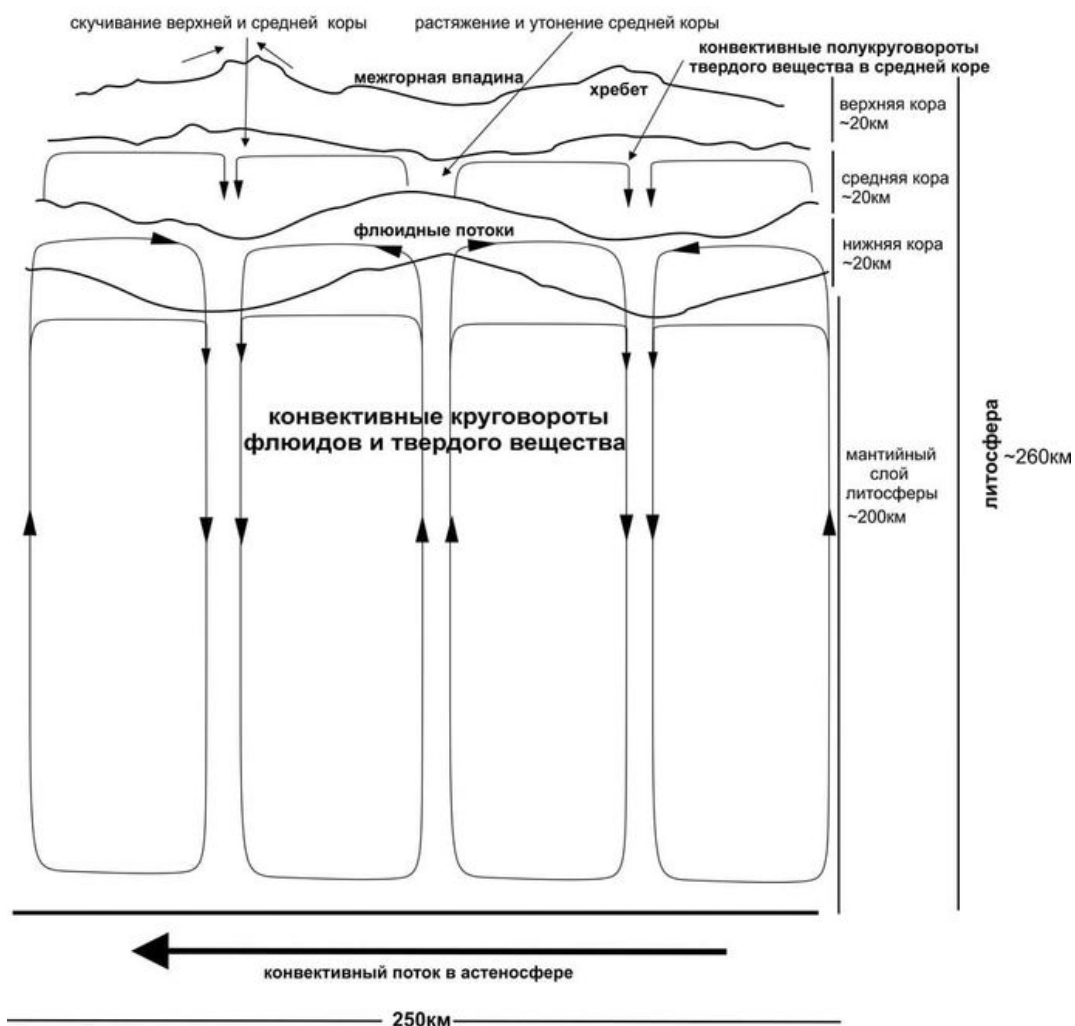


Схема Бабкин А.Г.



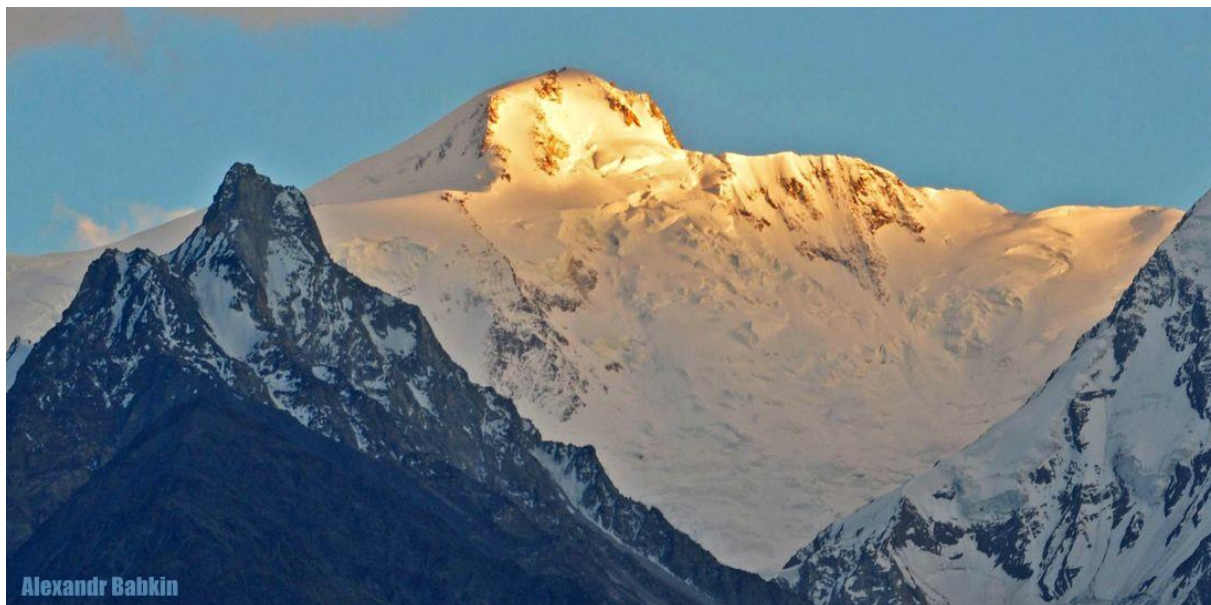
1-плиоцен-четвертичные отложения впадин; 3- верхняя кора; 4- средняя кора; нижняя кора; 6- мантия; 7- разломы; 9- конвективные потоки. «Особенности глубинной структуры депрессионных областей Центрального Тянь-Шаня» Макаров В.И. и другие. 2012

Сейсмический профиль коры и верхней части мантийной литосферы Внутреннего Тянь-Шаня

Горообразование можно разделить на три этапа: ранний – когда идут процессы тектонического сжатия большей частью с начальным складкообразованием; средний этап – при котором получают широкое распространение разрывные структуры надвигового и поддвигового характера; и зрелый этап – когда в ход горообразования в полную силу включаются процессы метаморфизма и гранитизации и максимально проявляется эффект изостазии при утолщении орогенной области за счет сжатия.

На протяжении всего процесса орогенеза площадь литосферных плит сокращается и утолщается за счет общего сжатия литосферы под действием конвективного потока в астеносфере. Область горообразования при этом расширяется за счет деформации следующих районов по ходу конвективной струи в астеносфере, где поток разогрел литосферу до возможности появления в ней собственных конвективных течений.

В настоящее время в области орогенеза почти всегда присутствуют гранитные и гранито-гнейсовые толщи, образованные в предшествующие эпохи. Поэтому современное гранитообразование явление редкое и на дневную поверхность нередко выходят древние интрузивные и метаморфические массивы. При этом гранитоиды могут подниматься на дневную поверхность как в месте встречных конвективных круговоротов, то есть в области сжатия, так и в области расхождения конвективных потоков, то есть в области растяжения.

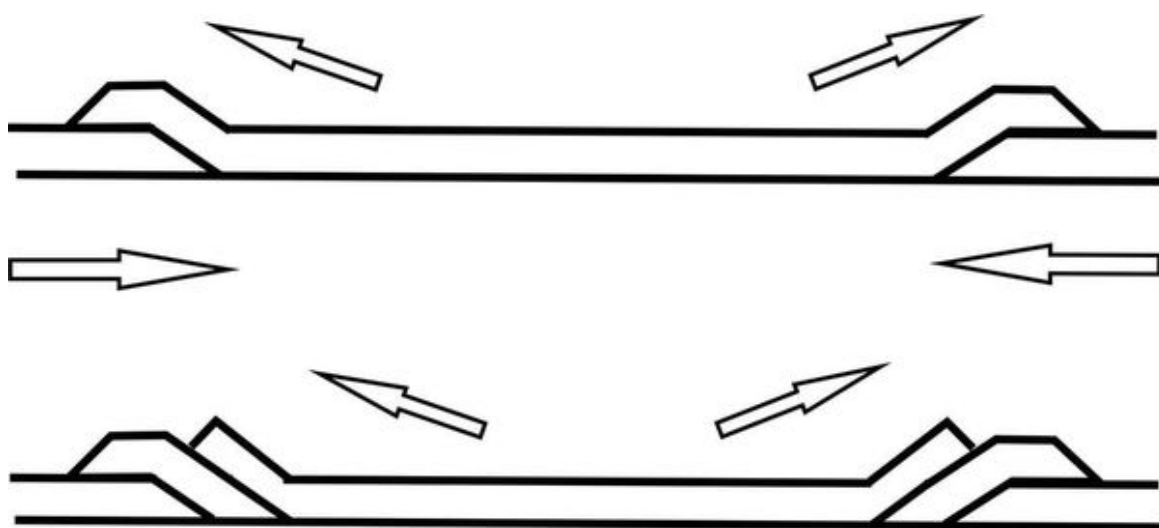


Гора Хевад (6804м) сложена архейскими гнейсами. Гиндукуш

В области сжатия древние интрузивные, гранито-гнейсовые и другие метаморфические массивы поднимаются на дневную поверхность за счет выдавливающих сил. В области растяжения подъем древних массивов происходит, во-первых за счет раздвига перекрывающих отложений и снятия нагрузки с подстилающих толщ и, во-вторых благодаря восходящему движению вещества средней и нижней коры.

Складчатость при горообразовании

В первой стадии образования неколлизионного складчатого горного хребта над коровым конвективным круговоротом на земной поверхности формируется геосинклинальная впадина с чередованием синклиналей и антиклиналей или только с надвигами. Через десятки тысяч лет в процесс образования геосинклинали подключается конвективный круговорот встречный первому. Геосинклиналь сжимается, втягиваясь конвективными потоками в глубину, а толщи, слагающие впадину претерпевают блоковые деформации в виде надвигов, реже поддвигов, а также сдвигов отдельных блоков (чешуй). В дальнейшем при классическом развитии процесса, геосинклинальная структура **выдавливается единым блоком вверх** под сжимающим действием боковых блоков с флангов.



Под действием встречных конвективных потоков Ангарского с севера и Индостанского с юга, земная кора деформируется в виде геосинклинальной складки (в центре) с последующим надвигом пластов по периферии синклинали и формированием хребтов, которые в будущем сомкнутся в единую горную систему. Восточный Тянь-Шань, хребет Богдо-Шань



Горные массы под геосинклиналью позднее выдавливаются вверх единым блоком с образованием горного хребта. Насколько упорядочено или хаотично деформируются горные породы глубже неизвестно. Восточный Тянь-Шань, хребет Богдо-Шань



Схема формирования Гиссаро-Алая

Во второй стадии серия последовательных надвигов блоков осадочных пород придает хребту чешуеобразный вид. Наличие в зоне орогенеза ранее смятых осадочных слоев, интрузивных и эффузивных массивов могут значительно усложнить картину формирования складчатого хребта, но широкое распространение полого залегающих отложений дают полное представление о последовательности складчатого этапа горообразования.

При коллизионном орогенезе складчатость начинается непосредственно с крупных тектонических деформаций – большей частью надвигов, а также поддвигов и вдвигов с широким развитием кулисообразной складчатости и других видов неразрывного смятия вплоть до образования шарьяжей.

Шарьяж или покров – надвиг обширных смятых пластов на относительно ровную поверхность равнин. Строго говоря, покровы относятся к процессу горообразования

косвенно, представляя собой перемещение по равнинной поверхности уже готовой горной системы. Покровам с большой амплитудой перемещения способствует протяженное горизонтальное конвективное течение в среднем слое коры, с которого срывается хрупкая верхняя кора, а также ровный и пластичный субстрат по которому движется горное сооружение.

Горные сооружения в зонах контактов орогенных областей с платформами часто надвигаются на равнину платформы с образованием предгорного прогиба, заполненного продуктами эрозии гор. При этом предгорный прогиб образуется не только за счет тяжести надвигающегося хребта, но и за счет конвективного движения горных масс средней коры направленного вниз. Такое структурное положение может являться этапом **формирования следующего горного хребта на платформе, если наберет силу конвективный круговорот встречный по отношению к круговороту, который уже сформировал надвигающийся хребет.**

Межгорные впадины и равнины, разделяющие хребты, представляют собой: 1. отражение мантийного поднятия в месте восходящего конвективного потока; 2. реликт плиты доскладчатой эпохи; 3. участок утяжеленной коры (офиолитовые пояса основания, насыщенные гипербазитовыми телами, вулканические плато длительного функционирования); 4. синклиналь на которую с противоположных сторон надвигаются блоки горных массивов.

Интрузивные процессы при орогенезе

С первого или второго этапа складчатого горообразования в нижней и средней коре орогенной области горные массы, как правило, подвергаются региональному метаморфизму до амфиболитовой и гранулитовой фации. На этих этапах возможны явления ультраметаморфизма (гранитизации) с последующим внедрением гранитоидных интрузий. Метаморфизм протекает за счет повышения давления и температуры сопутствующие сжатию в зоне орогенеза. При этом повышение температуры происходит большей частью не из-за нарастания давления, а за счет разогрева нижней коры конвективным потоком в нижележащей мантии.

Анатексис – расплавление метаморфических и осадочных толщ и, в редких случаях, магматических образований происходит при внедрении магмы и флюидов из мантии, чему способствует распространение разрывных нарушений в коре при горообразовании.

Самым распространенным флюидом является вода. В присутствии воды температура плавления горных пород может понижаться на сотни градусов. Вода может выделяться

из мантийных и коровых пород в процессе дегидратации под воздействием температуры.

Плавление горных масс при **анатексисе** под воздействием мантийных флюидов проходит частично и избирательно. Сначала при температурах 600-850°C и при давлении 1000-2000 бар выплавляются минералы кварц-полевошпатового состава, то есть наиболее легкоплавкие минералы, но если температура продолжает повышаться, то порода может расплавиться полностью. **Первые выплавленные «капли» жидкой фазы выжимаются наверх, в результате чего постепенно образуются магматические очаги скопившегося расплава, обогащенные кварцем и полевыми шпатами. Выжимаемый гранитный расплав, ввиду своей высокой температуры и пониженной плотности по сравнению с окружающими горными массами, просачивается вверх со скоростью от нескольких сантиметров до нескольких метров в год.** Анатексические расплавы образуются на глубинах 10-40км.

Кроме того, при анатексическом плавлении под действием флюидов, которые как правило обогащены кислородом и кремнием ввиду высокой подвижности и химической активности этих элементов, происходит гранитизация корового вещества путем химического замещения исходного состава горных пород минералами с высоким содержанием кварца. Расплав гранитного состава может получаться за редкими исключениями из любых осадочных, магматических и метаморфических пород. **Основные массы гранитов нашей планеты это продукты частичного плавления пород земной коры. Образование гранитов сводится к дегидратации амфибола при нагревании пород коры и переходу в расплав кварца и части плагиоклазов. В процессе формирования земной коры относительно легкие выплавки гранитоидных интрузий перемещались вверх, сформировав в итоге современную континентальную кору в значительной мере гранитного состава.**

Гранитоидные магматические очаги во время своего поднятия (интрузии) с проплавлением и раздвигами вмещающих пород постепенно кристаллизуются с образованием интрузивных тел различной морфологии – чаще всего это многокилометровые батолиты. **Верхняя часть интрузивного массива по мере поднятия остывает с почти полным прекращением роста кристаллов. Тем не менее, под действием все еще горячей нижней части и выжимающих сил встречных конвективных потоков, граниты могут продолжить подъем вплоть до земной поверхности с образованием интрузивных хребтов, отдельных скальных массивов, сети вертикальных и горизонтальных гранитных даек, силлов и других тел.**

Нарращивание мощности литосферы в орогенных областях

– это один из важнейших и малоизученных вопросов орогенеза. Главными причинами увеличения мощности коры в процессе горообразования являются: 1. приток магмы и флюидов в литосферную мантию из астеносферы с последующим коровым

гранитообразованием; 2. поддвиги литосферных плит под противостоящие плиты со сжатием мантийного слоя литосферы; 3. скупивание пластов земной коры.

Приток разогретого вещества из астеносферы – самый сложный фактор увеличения мощности поднятий во внутриконтинентальных областях. В начальной стадии приток флюидов размягчает литосферу и нижнюю кору с образованием в числе прочего гранитных масс. Затем **магматические расплавы подвергают эрозии вышележащую литосферу, частично замещая и перерабатывая вещество литосферы.**

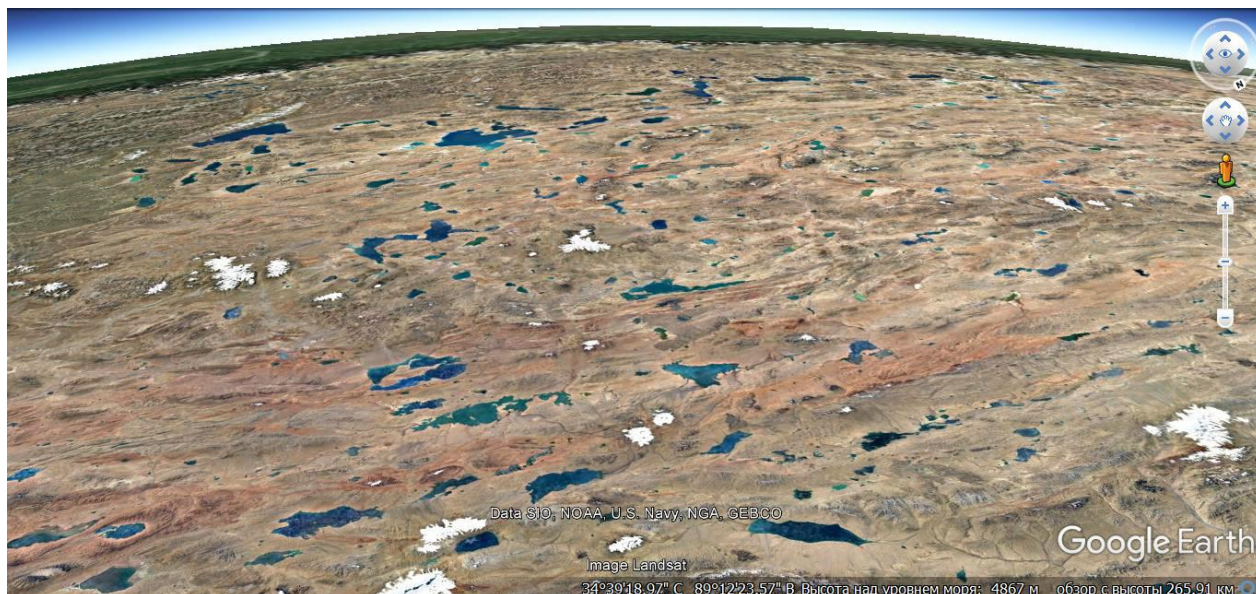
Ускоренное вздымание в плиоцене и антропогене Центрально-Азиатской горной системы (Гималаи, Тибет, Гиндукуш, Памир, Тянь-Шань и другие хребты) связано с аномально интенсивным притоком разогретых конвективных струй из астеносферы. Например, в результате горизонтальных перемещений мантийная часть плит Тянь-Шаня отслаивается и погружаясь, замещается веществом астеносферы, а **кора, лишенная подстилающей мантии, становится более хрупкой и податливой для деформации.**

Погружение Индийской плиты под Тибет сопровождается аналогичным отслоением мантийной литосферы Индии и погружением ее в астеносферу, но при этом менее плотная коровая часть Индийской плиты всплывает, становясь частью подошвы тибетской плиты и вызывая тем самым подъем Тибетского плато. Нетипичное горообразование Тибета является причиной нетипичного рельефа плато, где высокогорные равнины перемежаются с обледенелыми часто бесформенными массивами в отличие от вытянутых параллельных хребтов Тянь-Шаня и Гималаев.

Разнонаправленное положение хребтов Алтая и Саян объясняется наложением неотектонических деформаций поперек древних горных структур коры, вызванных **встречными конвективными течениями в астеносфере этого региона – Индостанским течением в северном направлении и Ангарским в южном направлении.**



Схематичный разрез коллизионной области по линии Индостан-Казахстан. Бабкин А.Г.



Тибет

Горообразование является итогом не только межплитной коллизии и внутриплитного взламывания литосферы, но также результатом структурно-вещественных преобразований и течений вещества литосферной мантии.

Тектоническая расслоенность литосферы обуславливает различное поведение вещества коры и мантии, что позволяет мантийному слою литосферы перемещаться не в жесткой сцепке с корой.

Геофизическая, геохимическая и структурная неоднородность самой коры создают условия неоднородной деформации слоев, которые могут двигаться с разной скоростью и нередко деформироваться почти независимо друг от друга. Послойное перемещение вещества носит неравномерный характер и может проявляться во всех масштабах – от слоев мощностью в десятки километров до прослоев толщиной в считанные сантиметры.

Различная мощность коры является следствием не только магматизма, осадконакопления и складчатости (в том числе разрывных нарушений), но и следствием перетекания вещества в разнородных слоях.

Например, большие объемы интрузивных пород ведут себя пластично и деформируются по законам гранулированных тел с интенсивной дезинтеграцией на мега- и микроуровнях с формированием разнонаправленных трещинно-разломных систем, брекчированием, катаклизом (однонаправленная деформация породы на уровне кристаллических зерен) и т.п.

Пространственное перераспределение горных масс происходит с перетоком из областей относительного сжатия в области относительной разгрузки – декомпрессии, то есть идет выжимание (протрузии) гранитных тел в направлении меньшего литостатического давления.

Общая тектоническая картина на позднем этапе формирования горных поднятий объясняется пластичным перераспределением интрузивных масс – воздыманием в срединных областях поднятий и реверсным нагнетанием масс пород в стороны от срединных части хребтов.

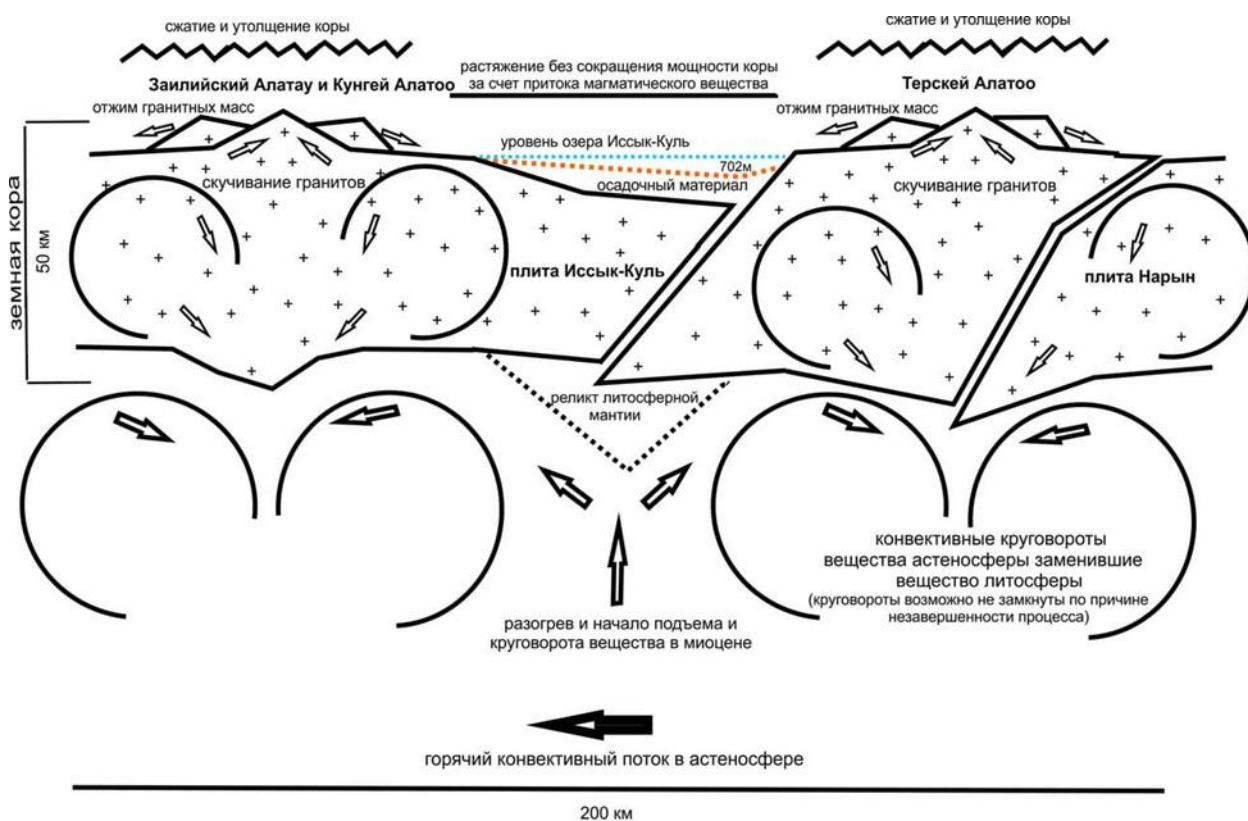
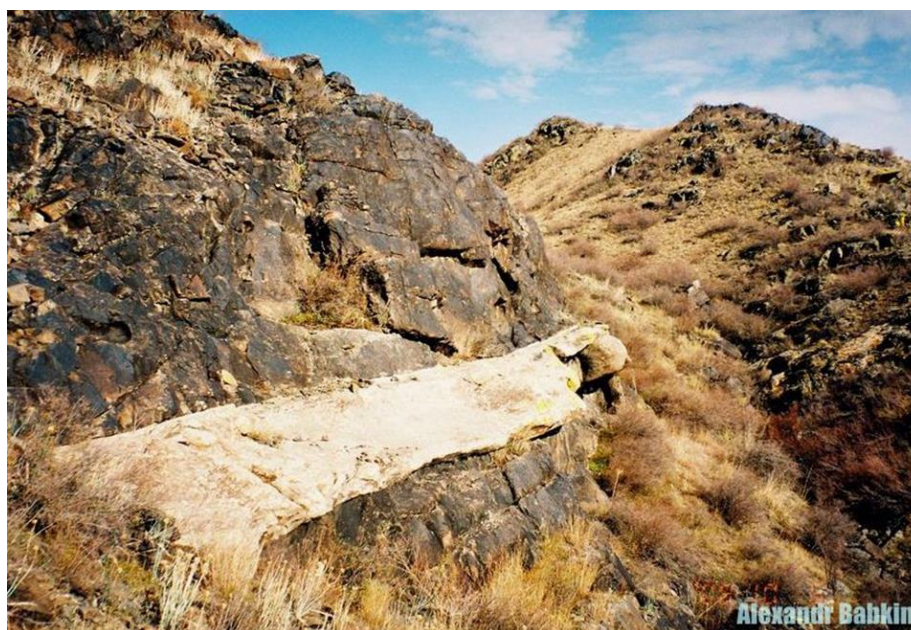


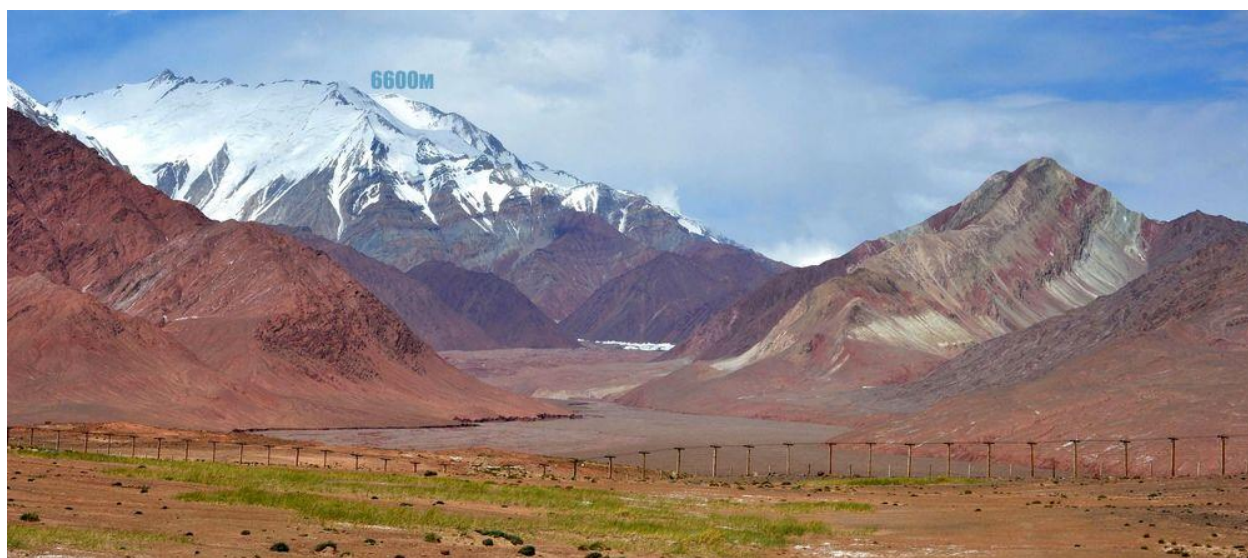
Схема формирования в плиоцен-четвертичное время Иссик-Кульской впадины и хребтов Терскей и Кунгей Алатау, сложенных в основном гранитами палеозоя



Слой гранита в осадочных отложениях. Северный Тянь-Шань



Вертикальная складчатость. Гиссаро-Алай



Западный Кунь-Лунь