

Краткий обзор современного уровня понимания процессов гранитообразования

Граниты в основном состоят из полевых шпатов: ортоклаза $KAlSi_3O_8$, альбита $NaAlSi_3O_8$, олигоклаза $(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$ на 60-65%, а также кварца SiO_2 – 25-35% и биотита – 5-10%. Граниты составляют около 77% объема всех магматических пород в верхней части континентальной земной коры. Для Земли характерно широкое распространение гранитных пород, что обусловлено сложным рециклингом преобразования горных пород земной коры – от магматических пород к осадочным, метаморфическим и снова к магматическим большей частью гранитного состава, после чего рециклинг может повториться. На других планетах Солнечной системы граниты, возможно существуют, но определенно в весьма небольших количествах ввиду слабой и простой тектонической деятельности, не способной поддерживать столь сложную эволюцию коры как на Земле.

Гранитные породы или гранитоиды (к которым можно отнести еще гранодиориты (и другие породы кислого состава с приставкой grano-), адамеллиты, кварцевые диориты, а также мигматиты и гранитогнейсы) формировались двумя путями: 1. Дифференциация первичной магмы основного состава на ультраосновную, основную, среднюю и кислую (гранитную) фракции; 2. Метасоматическая переработка без расплавления горных пород и тесно связанное с процессами метасоматоза явление анатексиса с расплавлением любых горных пород под действием магматических флюидов и внедрений магматических расплавов с образованием гранитоидов.

По-видимому второй путь является главным для гранитообразования, о чем в первую очередь свидетельствует незначительное присутствие гранитных пород в океанической коре и широкое распространение гранитоидов в континентальной коре главным образом в ее верхней и средней зонах и, возможно в нижней «базальтовой» коре, чье название условно и отвечает лишь сейсмическим признакам при геофизическом зондировании. Кроме того постоянное совместное

присутствие гранитов с другими породами разного состава и генезиса также говорит в пользу второго пути.

Из экспериментальных данных вытекает следующий механизм образования вторичных гранитных магм – частичное плавление мелкообломочных осадочных кварц-полевошпатовых пород: песчаников, алевролитов и т.д., ранее образованных магматических пород и метаморфических пород существенно кислого состава: гнейсов и т.д.

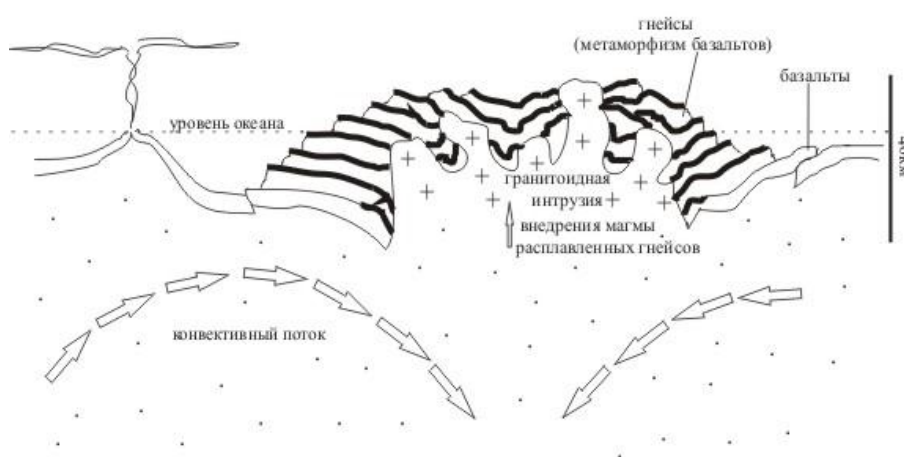
Экспериментальные данные также подтвердили важную роль воды в формировании гранитных магм. Установлено, что безводные расплавы гранитного состава образуются при температуре не менее 950°C, тогда как природные гранитные магмы имеют начальную температуру 850-650°C. Источником воды в гранитном расплаве, могут быть гидроксилсодержащие минералы, главным образом слюды и амфиболы.

Источники гранитных магм, отвечающих по составу реально наблюдаемым породам, расположены в континентальной земной коре на глубине от 7 до 40км, где литостатическое давление достигает 10 000 атм.

Гранитообразование, связанное с фракционированием (дифференциацией) базальтоидных магм и с непосредственным выплавлением магм среднего и кислого состава из первичной базальтовой коры и подкорового магматического океана, имело ведущее значение на ранних стадиях формирования гранитоидов в архейской зоне. Начиная с протерозоя, главенствующая роль в гранитообразовании навсегда переходит к ультраметаморфическому метасоматическому и анатектическому механизмам.

Расслоение земной коры в процессе архейского гранитообразования на гранитный слой и базальтовый слой усиливалось по мере формирования осадочно-метаморфических толщ, состав которых в протерозойский эон уже соответствовал гранодиоритовому. Соответственно переплавление осадочного слоя всегда приводило к формированию кислых и средних интрузивных масс.

Начало формирования континентальной коры (гранито-гнейсового купола) в архее



Дифференциация магмы

Первичная (ювенильная) магма, которая внедряется в земную кору из мантии, всегда имеет и имела основной (базальтовый) состав (исключая, вероятно архейское время). Представление о том, что каждая магматическая порода образовалась из особой первичной магмы, неверно, но существуют гипотезы и о перидотитовой и анортозитовой первичной магме.

Дифференциация магмы на глубинах от нескольких километров до нескольких десятков километров сводится к последовательному образованию кристаллов и их всплыванию или оседанию из остаточного расплава, а также расслоению жидких фракций под влиянием гравитации и конвективных потоков в очаге расплава. Важную роль при кристаллизации магмы играют такие факторы как присоединение новых химических соединений (ассимиляция) и потеря летучих веществ (флюидов).

Ход дифференциации на отдельные слои по содержанию кремнезема (SiO_2) из родоначальной основной магмы выглядит так: *Габбро-перидотитовая (ультраосновная) – Диоритовая (средняя) – Гранитная (кислая) – водные растворы.*

Из ультраосновного расплава кристаллизуются интрузивные и эффузивные породы (в зависимости от глубины застывания) с содержанием $\text{SiO}_2 < 45\%$: перидотиты, дуниты, пироксениты, пикриты и другие; Из основного: габбро, диабазы, анортозиты и др. (SiO_2 50-55 %); Из среднего: диориты, сиениты, андезиты, трахиты (SiO_2 60%); Из кислого расплава: граниты, гранодиориты, плагиограниты, кварцевые диориты, риолиты (SiO_2 63-65%).

Осаждение кристаллов тяжелых минералов в менее плотной жидкости эффективно на ранних стадиях, когда жидкая магма еще не слишком вязкая. Всплывание легких кристаллов (например, полевого шпата), вероятно, менее распространенный процесс.

Одновременно с осаждением и всплыванием кристаллов появляется газовая фаза в виде мельчайших пузырьков H_2O , CO_2 , HCl , HF , SO_2 и др., которые поднимаясь вверх, по-видимому, садятся на отдельные кристаллы, способствуя их всплыванию. Газы расплава могут кроме того выдуть остаточную жидкость вверх в массив пород, вмещающих магматическую камеру.

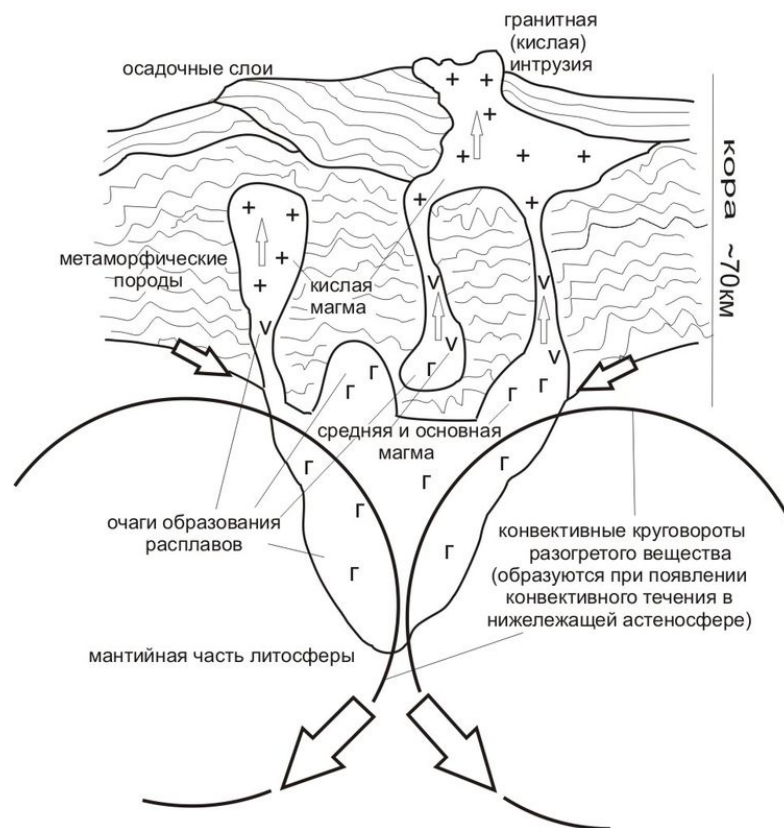
При **эманационной дифференциации** магмы происходит разделение вещества расплава за счёт образования химических соединений с трансмагматическими флюидами, способными к обособлению.

При кристаллизации магмы до состояния вязкой массы, остаточная жидкость расплава может выжиматься при подвижках вмещающих пород, с образованием отдельного тела.

Когда магма полностью кристаллизуется, она образует изверженную породу, которая никогда не была полностью жидкой и которая сложена веществом исходной магмы и вмещающих пород.

Вышеперечисленные процессы в целом представляются достаточными для объяснения магматической дифференциации.

горообразование и магматизм область утолщения, деформации и повышения температуры литосферы



Один из вариантов анатексиса и возможной последующей дифференциации магмы

Однако невозможно представить образования громадных масс гранитов за счет только дифференциации базальтовой магмы. В ходе дифференциации базальтовой магмы вместе с гранитами должны образовываться ультраосновные породы, которые встречаются довольно редко.

Ультраметаморфизм

Гранитообразование тесно связано с региональным метаморфизмом, наблюдающийся только над участками астеносферы, где увеличивается тепловой поток и который инициирует конвективное перемещение горных пород земной коры и внедрение в кору горячих флюидальных растворов и магмы из мантии способных расплавить коровое вещество. Далее – под действием конвективного перемещения пород, в частности в местах схождения двух конвективных круговоротов, **кора деформируются, что приводит к процессам орогенеза. В свою очередь деформация и утолщение коры вызывает увеличение температуры, что может привести к почти полному расплавлению пород любого происхождения в толще земной коры. Вероятно, расплавление горных пород при ультраметаморфизме происходит на глубинах от 30 до 7 км большей частью из гранулитов – глубокометаморфизованных пород. Гранитное вещество, при дальнейшем подъеме, может находиться в частично расплавленном виде до глубины 1 км.**

При орогенезе гранитообразование идет наиболее интенсивно и быстро – выделение и скопление достаточно крупных гранитных тел до нескольких километров в диаметре, вероятно

может занять 10-30 000 лет. Однако время достижения необходимой температуры, при которой может выделяться гранитный расплав, занимает не менее 1 миллиона лет.

Совокупность этих процессов приводит к крайним проявлениям ультраметаморфизма – к анатексису – расплавлению и превращению в магму твёрдых пород до этого не находившихся в состоянии расплава под действием гидротермальных (жидких) и пневматолитовых (газовых) флюидов со значительным выносом и привносом химических соединений; и палингенезу аналогичному расплавлению твердых пород, до этого уже находившихся в расплавленном состоянии (магматические породы) с менее значительным выносом и привносом химических соединений.

Анатексис и палингенез (далее в тексте оба явления ввиду отсутствия четкой границы между ними именуются одним термином – анатексис). Преимущественными процессами анатексиса являются: 1) плавление горных пород при диффузии (просачивание через кристаллическую решетку) и инфильтрации (поровое просачивание) газовой-жидких растворов с высокотемпературным замещением, привносом и выносом веществ; 2) реоморфизм – плавление горных пород, вызванное внедрением магмы образованной первым процессом.

Анатектические расплавы образуются путем не полного переплавления коровых пород, а частичного. Расплавленная фракция субстрата, подвергнувшегося анатексису, в виде капель выдавливается вверх и скапливается в очаги магматических расплавов. В дальнейшем расплав поднимается, расплавляя и раздвигая вмещающие породы, либо остается на месте и постепенно затвердевает в виде интрузивных тел. Как правило, анатектические гранитоиды содержат ксенолиты (включения) метаморфических или осадочных пород, захваченные в магму во время ее подъема. Породы основного и ультраосновного составов анатектического генезиса в верхней и средней континентальной коре, значительно менее распространены, так как средняя и верхняя зоны коры (первично осадочно-метаморфическая) до глубин в среднем около 25км имеют преимущественно кислый и средний состав. О составе нижней коры науке до сих пор мало, что известно. Анатектические преобразования пород были больше характерны для архея и раннего и среднего протерозоя. Со времени позднего протерозоя ведущим процессом гранитообразования на Земле становится метасоматоз, то есть процессы, проходящие без расплавления пород из-за низкого температурного градиента земной коры поздней эпохи истории Земли.

Формирование плагиоклазовых гранитов связывают с частичным плавлением менее кремнекислых кварц-плагиоклаз-амфиболовых магматических пород, залегающих в нижней зоне континентальной земной коры и когда-то выплавленных из мантии, залегающей на глубинах от 40 до 100км. Плавление пород на этих глубинах с образованием гранитов, сводится к дегидратации амфибола и переходу в расплав кварца и части плагиоклаза.

Температура начала анатектического гранитообразования находится в пределах 660-740°C при давлении 2000 атм для пород, в состав которых входят кварц, плагиоклаз и калийсодержащие минералы. Нахождение воды в расплавляемых массах существенно влияет на температуру их плавления – высокое содержание воды понижает температуру плавления и наоборот. Кроме того присутствие воды способствует процессу растворения пород окружающих магматический очаг.

Метасоматическое гранитообразование

Формирование гранитоидов в толщах любых горных пород, но большей частью осадочных и метаосадочных, под действием гидротермально-пневматолитовых растворов (флюидов) без расплавления или с незначительным расплавлением пород называется метасоматическим гранитообразованием. Для гранитоидного метасоматоза характерно значительное изменение минерального и химического состава перерабатываемых пород, которое сопровождается привнесом и выносом химических соединений, где значительную роль имеют вода и щелочи (Ca(OH)₂, NaOH, KOH и др.)

Метасоматическое гранитообразование протекает при температуре от 500 до 1000°C на глубинах от 20 до 1км.

Гранитоидный метасоматоз происходит при трех типах геологических условий:

в районах горообразования при тектонической активизации земной коры, то есть в зоне ультраметаморфизма воздымания – этот тип имеет наибольшее значение при образовании гранитоидов в современное геологическое время. В этих условиях образуются граниты, граносиениты и сиениты;

экзоконтактовое гранитообразование развито в контактах с интрузивно-магматическими расплавами и затвердевшими массивами;

при регионально-площадном распространении развивается процесс ультраметаморфизма погружения. В этих условиях гранитообразование может протекать и без существенного участия магматических и постмагматических флюидов, и даже вовсе без их участия, а граниты формируются за счет внутреннего перераспределения и перекристаллизации пород. В таком случае гранитообразование называется метаморфогенным.

Химизм и кристаллизация гранитной магмы

Для гранитов как и для всех интрузивных пород характерна крупно- и полнокристаллическая структура, что обусловлено глубиной застывания и кристаллизации пород. Интрузивные породы формируются в условиях медленного понижения температуры и под большим давлением вмещающих пород, что препятствует отделению минерализаторов, препятствующих отвердеванию магматического расплава. В таких условиях у минералов горной породы есть достаточное время и температура для роста кристаллов. Если магма охлаждается медленно и температура ее долго держится вблизи точки плавления, то образуется небольшое количество центров кристаллизации. При очень медленном охлаждении магма может полностью раскристаллизоваться, не достигнув поля, где образуется много центров кристаллизации.

Физическое состояние молекул в магме достоверно не известно. Прочно связанные анионные группы [SiO₄], вероятно, находятся в расплаве совместно со свободными катионами Fe²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ и Na⁺. Эти кластеры в жидкой фазе можно рассматривать как группы кремнекислородных и алюмокремнекислородных тетраэдров, связанных в сложные группы. Степень комплексности этих групп зависит от температуры и состава магмы – например, добавка небольшого количества (OH) или F вызывает распад крупных ионных групп, увеличивая текучесть расплава.

Появление расплавов в зонах ультраметаморфизма возможно лишь при наличии воды, понижающей температуру кристаллизации кварц-полевошпатовых пород. Главным источником воды в процессе плавления служат слюды (мусковит, биотит) метаморфических горных пород, которые при повышении температуры разлагаются с выделением H₂O. Например, мусковит разлагается с образованием ортоклаза, силлиманита и воды: $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + SiO_2 \rightarrow KAlSi_3O_8 + Al_2SiO_5 + H_2O$.

В результате **кристаллизации полностью расплавленной первичной магмы обычно выделяется не один твердый минерал, а несколько**. В процессе кристаллизации некоторые выделившиеся минералы во взаимодействии с расплавом появляются и исчезают, другие изменяют свой состав, третьи сохраняются в изначальном виде. **При кристаллизации расплавов богатых летучими компонентами процесс кристаллизации существенно усложняется**.

Последовательность выделения минералов при кристаллизации первичной кислой магмы: полевые шпаты – биотит – кварц.

При кристаллизации анатектической магмы кварц кристаллизуется из расплавленного состояния при температуре ниже 700°C, а полевые шпаты, имеющие в гранитизируемом субстрате температуру плавления выше 1000°C, не расплавляются, но растут из микроскопических кристаллов входивших в состав преобразуемых пород. В присутствии воды кристаллизация полевых шпатов идет при более низких температурах.

Гранитный расплав при давлении 1000 атм (соответствует глубине 2км) может растворить 3,75% воды, при давлении 4000 атм (глубина 15км) – 9,25%.

Присутствие летучих резко снижает температуру начала кристаллизации. 1% растворенной в расплаве воды понижает температуру кристаллизации примерно на 50°C, то есть при содержании 10% воды температура может понизиться на 500°C.

Главная особенность кристаллизации в присутствии флюидов – выделение газов при одновременной кристаллизации с понижением температуры. В результате в магме, пропитанной газовым раствором, начинается перекристаллизация. Далее, когда газы выделяются из магмы, начинаются пневматолитовые процессы метасоматоза во вмещающих (окружающих) породах.

Таким образом, присутствие в магме воды и других минерализаторов обуславливает возникновение в конце кристаллизации газового раствора. Этот раствор вызывает перекристаллизацию породы с образованием крупнозернистых структур.

Общая схема кристаллизации кислой магмы выглядит так: 1) выделение силикатов из магмы; газовая фаза еще не появляется; 2) «ретроградное кипение», когда из магмы выделяется и силикат и газовая фаза; 3) пневматолитовая стадия, когда силикат выделяется из газа; 4) стадия конденсации, когда появляются водные растворы и 5) гидротермальная стадия, когда силикат выделяется из водного раствора.

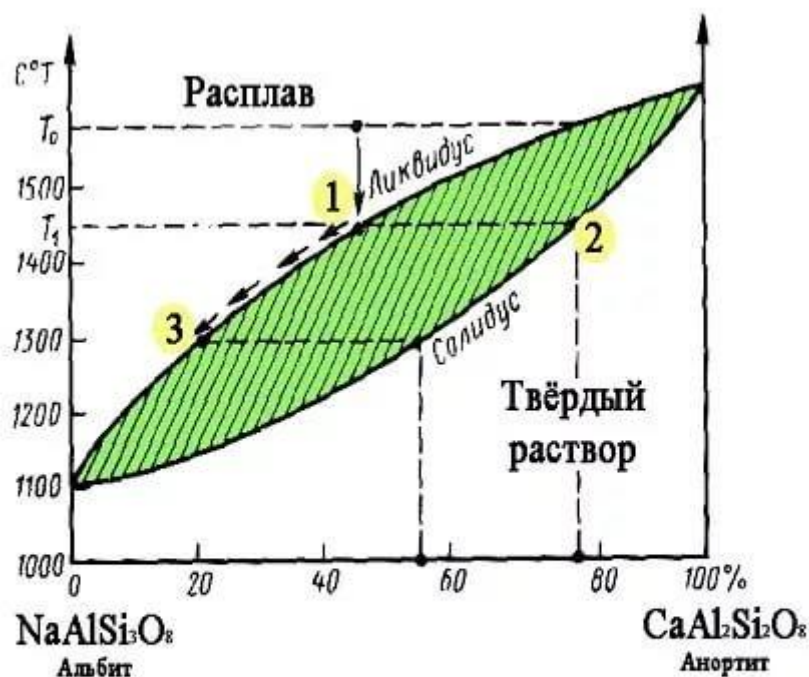


Рис.3 Диаграмма плавления для твердых растворов плагиоклазового ряда (по Н.Борзну).
Заштриховано поле сосуществования кристаллов и расплава. Состав выделившихся из расплава кристаллов определяется на оси абсцисс. 1-3 - различные стадии кристаллизации расплава.

Ликвидус – линия полного плавления твёрдых фаз выше которой находится только жидкость. Иными словами это температура, при которой в равновесных условиях выпадает первый кристалл.

Солидус – линия, на которой исчезают последние капли расплава, или температура, при которой плавится самый легкоплавкий компонент. Линия, ниже которой находится только твердая фаза.

Перемещенные и неперемещенные граниты

Насыщенный водой кислый расплав может возникнуть в процессе ультраметаморфизма мусковит-содержащих пород при давлении 2000-4000 атм на глубине от 16 до 7км (мусковит является главным источником воды при разложении в глубинных условиях).

Глубже мусковит разлагается при более высокой температуре и образованный при этом расплав становится перегретым и **недонасыщенным** водой.

Как указывалось выше, насыщение водой понижает температуру гранитного расплава, и, соответственно расплав теряет способность к дальней миграции (перемещению). И наоборот недонасыщенные водой расплавы способны к дальней миграции в силу своей высокой температуры.

Таким образом, перемещенные граниты произошли из глубоких коровых источников и имели более высокую начальную температуру. Если же источник располагается на меньшей глубине, то расплав затвердевает в виде **мигматитов** недалеко от места зарождения.

Однако, мигматизированные гранито-гнейсы способны перемещаться в область меньшего давления и при этом количество гранитного расплава может возрасти. Возможность такого перемещения обусловлено тем, что эти гранито-гнейсы, содержащие некоторое количество анатектического расплава, обладают меньшей плотностью и вязкостью (более текучие). Кроме того подъем пород сопровождается дополнительным нагревом, что является дополнительным фактором частичного плавления и возрастания подвижности гранито-гнейсов. Вследствие этого они механически неустойчивы и способны к подъему в виде диапировых куполов, аналогично тому, как поднимаются массы пластичной и легкой каменной соли. Многокилометровые гранито-гнейсовые купола, приуроченные к ядрам антиклинальных структур, весьма характерны для ультраметаморфических комплексов.

При подъеме интрузивного тела сквозь недра имеет место комбинация механизма переплавления и раздвига вмещающих пород. Интрузии при своем подъеме образуют промежуточные очаги в местах структурных препятствий в виде пологих разломов, стратиграфических границ и тому подобное. Испытывая затруднение при дальнейшем подъеме, расплав накапливается и образует интрузивные тела. Дальнейший подъем интрузии возможен при образовании трещины в кровле интрузивного тела или при достаточном повышении температуры магмы. В итоге часто интрузив имеет многоэтажную структуру с магмоподводящими каналами между интрузивными телами.

Подъем интрузии из очага своего образования с формированием батолитов – крупнейших интрузивных массивов, когда уже расплав не способен переплавить вмещающие породы, идет по разломам. Этот процесс сопровождается опустошением магматического очага, в который опускаются блоки вышележащих малоизмененных толщ с одновременным замещением освобожденного пространства интрузивной породой поступающей из разломов.



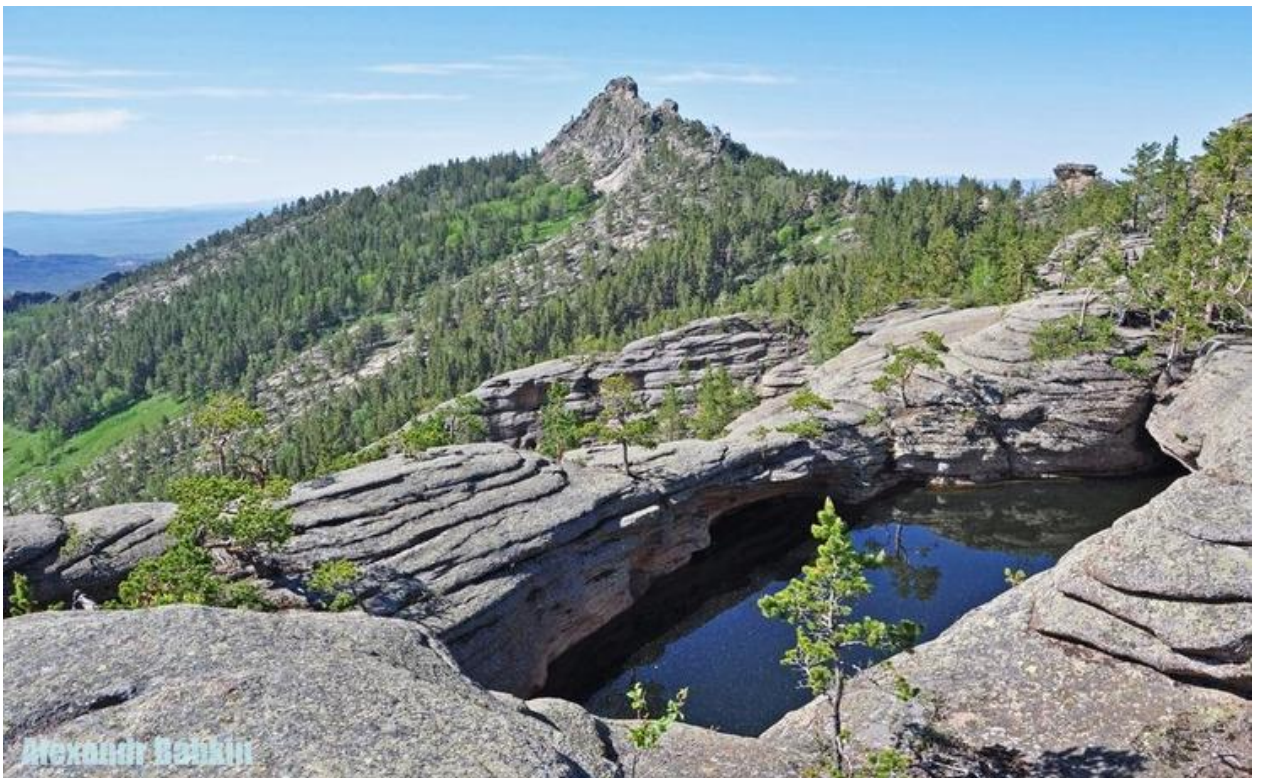
Пегматит - крупнокристаллическая преимущественно дайковая (жильная) порода. Жилы пегматитов достигают 3-5 км в длину и могут иметь мощность в несколько сотен метров. Наиболее распространены пегматиты кислых интрузий (гранитные пегматиты), однако известны пегматиты и других типов магматических пород: дунит-пегматиты, габбро-пегматиты, пироксенит-пегматиты и др.



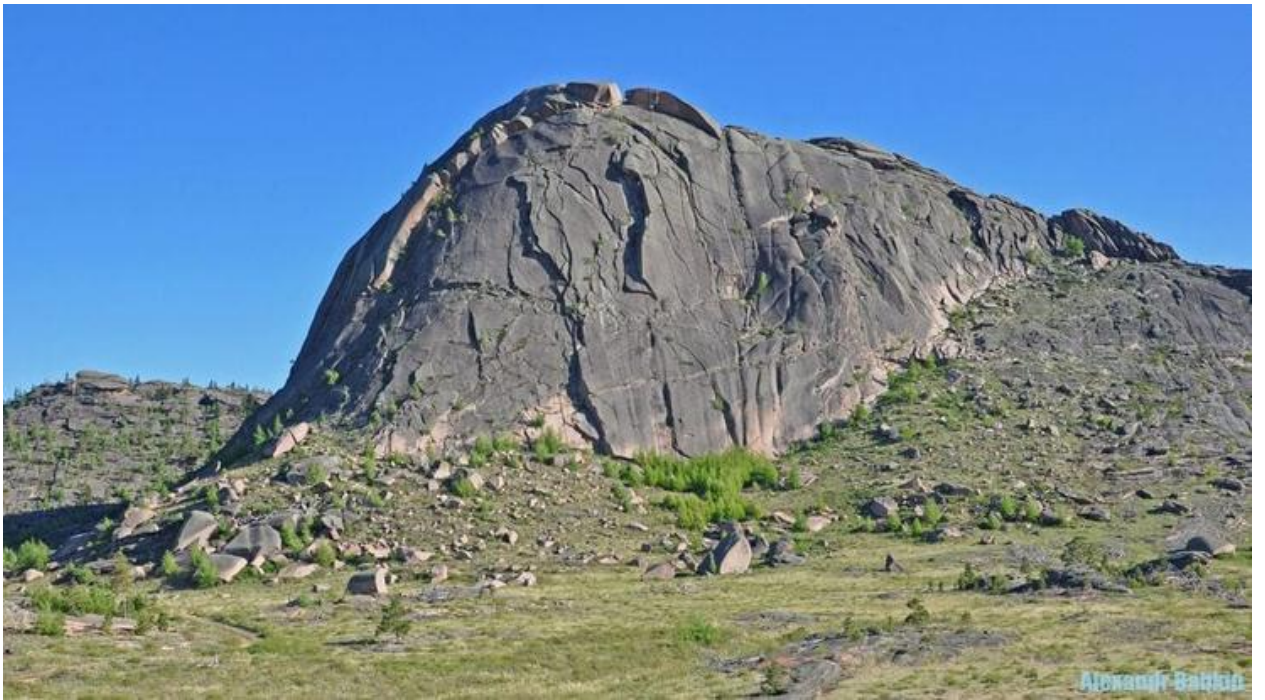
Мигматиты – неоднородные породы с рассеянным гранитным материалом, которые состоят из реликтов исходного метаморфического субстрата — палеосомы и новообразований, возникших при частичном плавлении – неосомы. Неосома, в свою очередь, состоит из более светлых полос, пятен, прожилков – лейкосомы, образованной затвердевшими скоплениями гранитного расплава (кварцем и полевыми шпатами), которые выплавились из палеосомы, и более темных полос и пятен с высоким содержанием биотита и других цветных минералов – меланосомы. Для многих мигматитов характерно тонкое чередование лейкосомы и меланосомы. Обособление лейкосомы и меланосомы не сопровождается привнесением-выносом химических элементов, а сводится к их пространственному перераспределению. Состав исходного субстрата (палеосомы) равен сумме составов лейкосомы и меланосомы. Разделение на лейко- и меланосому начинается в твердом состоянии вследствие метаморфической дифференциации, а завершается в процессе частичного анатектического плавления.



Гранитная дайка в песчаниках. Джунгарский Алатау



Каркаралинские гранитные горы. Центральный Казахстан



Баянаульские гранитные горы. Восточный Казахстан