



ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.24.01:514.758

ГЕОКИНЕМАТИКА ГОРНЫХ ХРЕБТОВ

Л.И. Четвериков

Воронежский государственный университет

Рассматривается геометрия общей формы и геометрия (анизотропия) строения горных хребтов. Устанавливается наличие связи между вытянутостью формы и анизотропностью строения горных хребтов. Анализируются возможные варианты геокинематики образования горных хребтов, объясняющие природу подобной связи.

В начале оговорим, что в данном случае геолого-тектонический объект, именуемый горным хребтом [1], рассматривается исключительно в геометрическом отношении. В связи с этим анализируется только кинематика образования горных хребтов, вне связи с вопросами их глубинного строения, природы и физико-химических процессов при этом протекающих. На первый взгляд подобный подход представляется несколько необычным, но он оказывается вполне оправданным с позиции геокинематики [2,3,4] и морфологической тектоники [5,6,7 и др.].

В общем, не вдаваясь в детали, горное сооружение можно разделить на две неравные по размеру части: верхнюю меньшую дислоцированную часть и значительно более крупную, по геофизическим данным, нижнюю, так называемую «корневую», часть. В данном случае под термином «горный хребет» понимается исключительно верхняя часть отдельного горного сооружения, подвергнутая дислокации, в результате которой образовались складки, сбросы, надвиги и другие тектонические формы.

В геометрическом плане горный хребет представляет собой сплюснуто-вытянутое геологическое тело [8], у которых отчетливо фиксируется три взаимно ортогональных геометрических элемента: длина (L), ширина (H) и мощность (M), соотносящихся друг с другом следующим образом $L > H > M$. В качестве показателя вытянутости хребта может служить значение величины $V = L^2/S$, где L – длина хребта по его оси; S – площадь хребта на дневной поверхности.

В строении горного хребта участвуют пласты осадочных и метаморфизованных пород, метаморфические, интрузивные и эффузивные образования и различные тектонические нарушения. Все они выступают в качестве элементов неоднородности строения хребта. Отличительной особенностью

хребта является отчетливо выраженная высокая анизотропность его строения: наиболее выдержанными в своем строении они оказываются по простиранию, наиболее изменчивы по мощности. Подобный факт позволяет говорить о наличии у них трехосной анизотропии строения характеризуемой тремя взаимно ортогональными направлениями или, по-другому, осями анизотропии. Наименьшая ось (I_L) ориентирована по длине хребта, средняя (I_H) по ширине и наибольшая ось (I_M) по его мощности, то есть $I_L < I_H < I_M$. Среднюю изменчивость строения хребта по его мощности практически определить невозможно, в то время как по его длине и ширине, на основе геологических и тектонических карт сделать это несложно [8]. В связи с этим в качестве показателя анизотропии хребта (A) приходится использовать отношение средней изменчивости его строения по ширине (I_H) к такой же по длине (I_L), то есть $A = I_H/I_L$.

Обнаруживается интересный факт – наличие связи между вытянутостью формы хребта и анизотропностью его строения. Чем более вытянутую форму имеет горный хребет тем анизотропнее его строение. Эта связь может быть выражена следующим отношением $A = KB$, где A – показатель анизотропии, K – коэффициент пропорциональности и B – показатель вытянутости.

Как показывают исследования, проведенные по определению анизотропии Урала, Сихотэ-Алиня, Кавказских хребтов [8], значения анизотропии A может меняться существенно, но при этом величина показателя пропорциональности K изменяется мало.

Наличие общей формы и анизотропии у горных сооружений, а также связи между ними, определяется общей геокинематикой орогенеза. В то время как особенности геометрии тектонического строения горных хребтов зависят от вариантов кинематических схем горообразования.

Морфология складок, их природа и происхождение самой складчатости достаточно хорошо рассмотрены во многих работах [5,6,7 и др.]. Однако при этом в стороне оказались вопросы геокинематики формирования горных хребтов.

Согласно существующим представлениям можно выделить три типа горных хребтов, которые как дальше будет видно отличаются и по кинематике их происхождения [1, 9].

К первому типу относятся горные хребты образовавшиеся в результате взаимодействия двух континентальных плит, так называемые хребты «орогена гималайского типа».

Второй тип представляют горные хребты, возникающие в результате субдукции, иначе хребты «орогена андийского типа».

Третий тип охватывает срединно-океанские хребты и асейсмичные хребты.

В целом геокинематика образования горного хребта представляет собой действие глобальных тектонических горообразующих сил на исходную окружающую среду. Набор горообразующих сил неодинаков у разных типов хребтов, так же как не одинаковыми оказываются и образуемые ими элементарные кинематические схемы. В то время как общая геометрия строения исходной окружающей среды оказывается одинаковой, если не учитывать вещественный состав и природу слагающих ее пород. Во всех случаях в роли исходной окружающей среды выступали горизонтально залегающие, слоистые осадочно-эффузивные толщи океанской коры, задуговых и междуговых бассейнов, вулканогенные образования активных окраин, осадочные толщи пассивных окраин и так далее. Геометрия ее общего строения описывается симметрией конуса ($\infty L_{\infty} \cdot \infty P$) [3, 4].

Начнем с рассмотрения геометрии формирования горных хребтов первого типа, обладающие многовариантными, наиболее сложными элементарными кинематическими схемами образования.

В общем виде геометрию генезиса отдельных хребтов гималайского типа можно представить как совместное действие трех глобальных тектонических сил на слоистую окружающую среду, указанной геометрией строения. Наложение геометрии кинематической схемы действия сил на геометрию среды образует геометрию горообразования.

В случае хребтов первого типа тектонические силы представлены двумя горизонтальными силами (g_1 и g_2) направленными навстречу друг другу и таким образом определяющими эффект сжатия, и одной плутонической силой (g_3), направленной вертикально вверх, усиливающей данный эффект и одновременно приводящей к поднятию хребта (I, A, рисунок). Подобная общая кинематическая схема имеет несколько вариантов реализации, в зависимости от поведения и ориентировки сил относительно простирания хребта, каждый из которых обладает своей симметрией и конечным результатом действия.

Эти варианты представляют собой теоретически и практически «элементарные» кинематические схемы, составляющих общую кинематику процесса образования хребтов первого типа. Теоретически в рамках данного типа возможно шесть вариантов элементарных кинематических схем.

Первый возможный вариант. Горизонтальные силы направлены навстречу друг к другу и ориентируются под прямым углом к оси хребта. Скалярная величина их действия одинакова ($g_2=g_3$) и она не меняется по фронту хребта (I, Б, рисунок). Вертикальная сила (g_1) так же остается постоянной в данном направлении¹. Кинематическая схема имеет максимально возможную симметрию равную $L_2 2P$. Если она реализуется в слоистой, с симметрией конуса, или изотропной окружающей среде, то образующийся в данных условиях горный хребет приобретает геометрию, имеющую такую же симметрию. При этом одна вертикальная продольная плоскость симметрии (p^I) проходит по длине, иначе оси хребта, вторая (p^{II}), поперечная так же вертикальная, проходит по ширине хребта, располагаясь в его средней части и ось симметрии второго порядка на пересечении данных плоскостей симметрии. Геометрия формы хребта определяется тремя геометрическими элементами: длиной, шириной и мощностью. Геометрия его тектонического строения тремя осями анизотропии, ориентированными по длине (меньшая ось), ширине (средняя ось) и мощности наибольшая ось. При иной более сложной геометрии окружающей среды горный хребет лишается оси и поперечной плоскости симметрии или даже может вообще не иметь элементов симметрии, если они отсутствуют у окружающей среды, например, перед возникновением хребта она была сильно дислоцирована или оказывалась крайне неоднородной. Но даже в этом случае горный хребет, при данной кинематике действия главных тектонических сил, приобретает трехосное анизотропное строение, согласующееся с тремя геометрическими элементами (длиной, шириной и мощностью) его общей, основной формы. Прямолинейная ось хребта проходит по его середине примерно на равном расстоянии от его боковых границ. Осевая часть хребта обозначается интрузивным комплексом, наличие которого обусловлено действием плутонических сил по оси хребта. Форма хребта линейно вытянутая с примерно постоянной шириной и одинаковыми симметричными склонами.

Основными тектоническими элементами горного хребта оказывают двусторонние надвиги и шарьяжи, а также двусторонняя складчатость, вергентность, конкретная форма которых определяется характером неоднородности строения исходной окружающей среды. Действие вертикальных сил провоцирует появление продольных разломов. В месте с тем данная кинематическая тектоническая схема

¹ На рисунке вертикальная сила g_1 не показана, т.к. она оказывается ориентированной перпендикулярно плоскости рисунка, кроме (I, А).

не предполагает возможность наличия поперечных и диагональных надвигов, шарьяжей, складчатости и сдвигов.

Для реализации в природе рассмотренной кинематической схемы необходимо чтобы сближение континентов происходило равномерно с двух сторон и по прямой линии на всем протяжении образования хребта.

Второй вариант первого типа, отличается от предыдущего только тем, что действие горизонтальных тектонических сил по оси хребта не постоянно, так же как и вертикальной силы (I, B, рисунок). В случае горизонтально слоистой или однородной исходной окружающей среды кинематика орогенеза имеет один элемент симметрии – вертикальную продольную плоскость симметрии P^1 проходящую по оси хребта. Соответственно таким же элементом симметрии обладает и геометрия хребта, образующегося в данных условиях. При иной геометрии окружающей среды кинематическая схема оказывается лишенной элементов симметрии. Все отличие действия данной кинематической схемы от схемы первого варианта заключается в том, что горный хребет оказывается невыдержанным по своей ширине. Другими словами ширина и высота его может быть существенно отличаться в разных его частях.

Третий вариант (II, A, рисунок). Данный вариант возникает тогда, когда горизонтальные тектонические силы действуют с обеих сторон с одинаковой силой и под одинаковым углом к линии схождения континентов или как сейчас принято говорить к линии «захлопывания». Действие горизонтальных сил g_2 и g_3 раскладывается на две составляющие g_2^I, g_2^{II} и g_3^I, g_3^{II} .

Силы g_2^I и g_3^I направленные навстречу друг к другу приводят так же как и в первом и втором вариантах к продольному смятию исходной окружающей среды с образованием тех же самых продольных тектонических элементов у горного хребта. Интересно другое. Так как составляющие g_2^{II} и g_3^{II} оказываются ориентированными по оси хребта навстречу друг другу и при этом имеют одинаковую скалярную величину ($g_2^{II} = g_3^{II}$), то возникает эффект поперечного сжатия деформируемой окружающей среды. В результате в тектонической структуре хребта возникают и элементы направленные поперек его простирания. Соотношение продольных и нормальных дислокаций определяется соотношением поперечных (g_2^I, g_2^{II}) и продольных (g_3^I, g_3^{II}) сил (II, A, рисунок). О наличии данной кинематической схемы в реальных условиях говорит отсутствие диагональных дислокаций в строении хребта. При прочих равных условиях эффект сжатия зависит от величины угла α между векторами движения континентов навстречу друг другу и осью хребта. Чем он меньше, тем значительней проявляется эффект поперечного сжатия, приводящих к появлению поперечных и близких к ним тектоническим нарушениям: складкам, шарьягам и надвигам, конкретное

местоположение которых определяется спецификой строения окружающей среды.

Кинематическая схема рассматриваемого варианта лишена элементов симметрии при любой геометрии строения окружающей среды. Действие вертикальной плутонической силы выражается в наличии интрузий в осевой части хребта. Причем, в связи с наличием эффекта сжатия, форма их оказывается более изометричной, слабо вытянутой по своей морфологии. Анизотропия строения горные хребты не отличаются от хребтов предыдущих двух вариантов. Непостоянство действия вертикальной плутонической силы приводит к неравномерному распределению интрузивных комплексов по фронту хребта.

Четвертый возможный вариант отличается от третьего тем, что силы g_2 и g_3 направлены под углом друг к другу, то есть углы α^I и α^{II} не равны и отличаются по своей скалярной величине (II, B, рисунок). В этом случае разложение действия сил g_2 и g_3 на две их составляющие приводит к тому, что данные составляющие оказываются не равными друг другу. Различие в действии сил g_2^I и g_3^I , обеспечивающих фронтальное сжатие хребта, влечет за собой различие в степени дислоцированности разных его сторон. Сторона подвергающаяся наибольшему сжатию (на II, B, рисунок сила g_2^I) оказывается более дислоцированной, чем противоположная сторона. Вследствие этого происходит смещение оси хребта в направлении более дислоцированной стороны и в этом плане горный хребет, в отличие от предыдущих вариантов, оказывается асимметричным – более крутым с одной стороны и более пологим с другой. Различие в действии продольных составляющих g_2^{II} и g_3^{II} приводит к возникновению сдвигового эффекта. В результате тектоническая конструкция хребта усложняется за счет дополнительного появления диагональных дислокаций, в том числе складчатости и продольных сдвигов. При этом степень дислоцированности двух флангов хребта оказывается разной.

Теоретически магматические образования, обусловленные действием плутогенной силы (g_1) должны при данной кинематической схеме располагаться в осевой части хребта, то есть быть смещенными к одной его стороне и концентрироваться на одном, наиболее дислоцированном, его фланге.

В геокинематическом плане пятый вариант отличается от всех предыдущих. Тектонические силы g_2 и g_3 направлены с двух сторон под углом друг к другу (III, A, рисунок).

В природе это наблюдается тогда, когда два коровых линиамента сталкиваются друг к другом, одновременно продолжая движения в одном направлении. В случае пятого варианта действующие силы g_2 и g_3 равны и направлены под одинаковым углом ($\alpha^I = \alpha^{II}$). Это приводит к тому, что два составляющих их компонента, силы $g_2^I, g_2^{II}, g_3^I, g_3^{II}$ так же оказываются равными между собой. Пара g_2^I и g_3^I осуществляет сжатие исходной окружающей среды,

приводя к ее продольному сжатию. В результате этого возникают продольная складчатость, шарьяжи, надвиги, разломы и другие тектонические элементы. Пара сил g_2^I и g_3^I приводит к параллельному перемещению лениаментов вследствие чего в деформируемой окружающей среде, образующий горный хребет, возникают поперечные разломы. Отсутствие диагональных тектонических нарушений, а также надвигов является характерной особенностью данного варианта. Соотношение между сжимающими силами (g_2^I и g_3^I) и сдвигающими силами (g_2^{II} и g_3^{II}) при прочих равных условиях, определяется величиной угла α . Чем он меньше, тем больше оказываются сдвигающие силы и, наоборот, чем больше, тем больше силы сжатия. Естественно, что это должно непосредственно сказываться на соотношении интенсивности проявления продольных и поперечных, нарушений. Хребет имеет симметричную форму, причем обе его стороны примерно одинаково дислоцированы; магматические и вулканические комплексы оказываются расположенными в основном в средней его части хребта.

Шестой вариант второго типа отличается от пятого тем, что силы сближения (g_2 и g_3) или различаются по своей величине, или направлены под разным углом α , или то и другое вместе взятое (III, Б, рисунок). Это приводит к тому, что составляющие g_2^{II} и g_3^{II} отличаются по своей величине, что в результате происходит движение двух сторон образующегося хребта в одном направлении с разной скоростью. Создается сдвиговый эффект, приводящий к появлению диагональных нарушений и продольных сдвигов. Интересно отметить, что во всех случаях когда наблюдается сдвиговый эффект диагональные нарушения имеют одностороннюю ориентировку, то есть оказываются направленными в одну сторону.

Представляется, что в условиях кинематических схем действия тектонических сил, при которых создается сдвиговый эффект появления пересекающихся, как бы направленных в противоположные стороны, диагональных тектонических нарушений теоретически невозможно.

Второй тип предполагает наличие двух тектонических сил: одной вертикальной (плутонической) g_1 и одной горизонтальной g_2 (IV, А, рисунок). Возникает в отличие от первого и второго типов односторонняя, в плане, кинематическая схема, так как вторая горизонтальная сила g_3 в этом случае практически отсутствует. Подобная ситуация наблюдается при субдукции, когда верхняя часть океанской коры сталкивается с неподвижной верхней частью континентальной коры в результате поддвигания океанской коры под континентальную [1, 9, 10]. У данной кинематической схемы возможны три варианта элементарных схем.

Первый вариант (IV, Б, рисунок). Столкновение происходит по прямой линии под действием силы g_2 , одинаковой по фронту столкновения. Симметрия данного варианта кинематической схемы сил

зависит от сжимаемой окружающей среды. Если она имеет слоистое строение или равномерно изотропное, или линейно-вытянутое, параллельное фронту столкновения, то данная кинематическая схема имеет вертикальную поперечную плоскость симметрии, направленную по направлению действия силы g_2 (IV, Б, рисунок). Соответственно и образующийся в этих условиях горный хребет будет иметь аналогичную симметрию, то есть обладать подобием в тектоническом строении обоих его флангов. При другой геометрии окружающей среды кинематическая схема лишается этого элемента симметрии. Но в том и другом случае горный хребет оказывается вытянутым вдоль фронта столкновения и получает трехосную анизотропию в своем строении. Отличительной особенностью является отчетливо выраженная асимметричная форма и строение хребта в его сечении. Один склон передний по отношению к фронту действия силы g_2 , крутой и более дислоцированы, в то время как противоположный более пологий и менее дислоцирован. Ось хребта сдвинута в сторону крутого склона, здесь же в основном и наблюдается наибольшее количество интрузивных проявлений, что не исключает возможности наличия вулканических проявлений и на другом пологом склоне хребта. Принципиальное отличие от горных хребтов, в случае четвертого варианта первого типа, заключается в практическом отсутствии пологой слабо дислоцированной части у «передового», т.е. обращенному к фронту действия силы g_2 , склона. Наглядным примером в этом отношении является ороген в зоне активного сочленения платформы и океанической коры, имеющий более пологий, менее дислоцированный склон на внешней стороне и крутой сильно дислоцированный на внутренней стороне.

Данная кинематическая схема определяет проявление продольных, параллельных простиранию хребта дислокаций (сбросов, надвигов, складчатости и других тектонических нарушений), конкретное местоположение обуславливается элементами неоднородности строения окружающей среды. Возможны отдельные поперечные разломы.

Второй возможный вариант третьего типа кинематических схем отличается от первого только тем, что величина действия горизонтальной силы g_2 меняется по оси хребта (IV, В, рисунок), что выражается в разной ширине и степени дислоцированности отдельных частей хребта. В этом же плане проявляется и различие в действии вертикальной плутонической силы g_1 вдоль фронта хребта. В результате отдельные части по фронту хребта оказываются более дислоцированы и интродированы, чем другие, где силы g_1 и g_2 проявляли себя в меньшей степени. Хребет лишен элементов симметрии. Возможно проявление поперечных сдвигов.

Третий вариант отличается от первых двух характером возможных дислокаций. В этом случае действие горизонтальной силы направлено под углом α к фронту столкновения (IV, Г, рисунок) и складывается на действие двух составляющих. Одна

из них (g_2^I) создает усилие сжатия окружающей среды. Другая g_2^{II} образует эффект бокового сдвига. В результате первая из них определяет асимметричную форму и строение хребта, а также наличие продольных дислокаций, в то время как вторая создает серию нормально ориентированных тектонических нарушений: разломов и возможно надвигов, шарьяжей, что определяется строением окружающей среды. Наличие диагональных нарушений данная кинематическая схема не предполагает, точно так же как и наличие элементов симметрии. Возможно появление продольных сдвигов.

Третий тип кинематической орогенной схемы состоит только из одной плутонической вертикальной силы g_1 , действовавшей вдоль оси хребта.

Горизонтальные силы g_2 и g_3 отсутствуют. Это случай образования срединно океанских хребтов, а также асейсмичных океанских хребтов, представляющих собой серию линейно расположенных вулканических аппаратов центрального типа. Особенностью настоящего типа кинематической схемы является то, что на нее не оказывает влияния геометрия окружающей среды, она остается одинакова при любой геометрии последней. В равной мере это касается и геометрии образующегося океанского хребта.

В том случае, когда действие плутонической силы остается постоянным по простиранию хребта, кинематическая схема имеет симметрию, состоящую из оси симметрии второго порядка и двух вертикальных плоскостей симметрии ориентированных вдоль и поперек хребта. Соответствующей симметрией обладает геометрия формы и строения горного хребта. Хребет приобретает линейно-вытянутую форму и трехосную анизотропию строения, причем оси анизотропии ориентированные по длине, ширине и по мощности хребта.

Из значительных тектонических нарушений присутствуют только крупные трансформные поперечные разломы, которые не связаны с кинематикой образования хребтов, а вызваны глобальными подвижками океанской коры и наличием отдельных магматических центров, а также местные продольные и поперечные дизъюнктивные нарушения обусловленные локальной неоднородностью в строении окружающей среды и местным проявлением вулканизма.

Вертикальная сила g_1 , с которой связана вулканическая деятельность может меняться по оси хребта. В этом случае вулканические постройки составляющие основу хребта, оказываются разными по своему размеру и высоте в отдельных его частях. Это приводит к тому, что у кинематической схемы и у хребта остается один элемент симметрии – продольная плоскость симметрии, проходящая по середине хребта. В нормальном сечении данные горные хребты имеют симметричную форму и их строение по обе стороны от оси практически одинаково.

В том случае, когда горный хребет оказывается искривленным по простиранию, или резко ме-

няет его, как в случае Полярного Урала, то это может быть связано или с соответствующей кривизной фронта движения материалов и линии субдукции или тем, что отдельные части горного хребта образовались в разное время при различной ориентировке горизонтальных тектонических сил.

В отдельный период орогенеза конкретного хребта реализуется одна из рассмотренных возможных элементарных кинематических, именно поэтому кинематическая схема считается элементарной. Очевидно, что одновременное проявление двух и более кинематических схем на одном объекте невозможно [9, 10].

Так же понятно, что большинство горных хребтов не являются «разовыми образованиями». Разовыми образованиями в том смысле, что в течение всего периода образования хребта действовала одна элементарная кинематическая схема. Представляется более вероятным, что в разные геологические периоды образования хребта происходила смена одной элементарной кинематической схемы другой в результате ли глобального изменения движения континентов или по каким-либо другим причинам глобального характера. В связи с этим помимо тектонических образований, возникших вследствие действия первой кинематической схемы, возникали тектонические образования, связанные с действием второй схемы. Например, если допустим, что при действии элементарной кинематической схемы, показанной на I, Б рисунок, возникали продольные элементы тектоники (разломы, подвиги и так далее), то при последующей реализации второй кинематической схемы, показанной на II, А, рисунок, образовывались уже поперечные элементы тектоники, вторичные к первым.

Поэтому при геокинематическом анализе образования отдельно взятого горного хребта очень важно вначале установить этапы его формирования. Затем определить последовательность возникновения тех или иных элементов тектоники, того или иного вида складчатости, разломов, надвигов и так далее. И только после этого переходить к реконструкции геокинематики (геометрии окружающей среды и кинематической схемы действия сил) имевшей место на том или ином этапе образования горного сооружения и на основании этого делать глобальные тектонические выводы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования РФ (шифр гранта Е02.-9.0-3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Словарь-справочник по тектонике литосферных плит. – М., 1993. – 73 с.
2. Четвериков Л.И. Геокинематика. // Отечественная геология. – 1993. – № 7. – С. 86-90.
3. Четвериков Л.И. Геокинематика – что это такое? // Смирновский сборник. – 2002. – М., 2002. – С. 236-256.

4. Четвериков Л.И. Геокинематика тектонических зон // Вестник Воронеж. ун-та. Сер. Естественные науки. -1996. -№ 2. -С. 63-77.
5. Палахта А.В. Генетические аспекты морфогенетической тектоники. – Алма-Ата, 1981. - 273 с.
6. Эз В.В. Складкообразование в земной коре. – М., 1985. - 285 с.
7. Камалетдинов М.А., Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. Происхождение складчатости. – М., 1981. - 289 с.
8. Четвериков Л.И. Оценка анизотропии геологических объектов // Вестник Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. –2000. № 9. – С. 26-31.
9. Структурная геология и тектоника плит / Под ред. К. Сейферта. – М., 1990. Т. 1-3. - 205с.
10. Пейве А.В., Савельев А.А. Структура и движения в литосфере // Геотектоника. – 1982. -№ 6. - С.5-24.
11. Миясиро А., Аки К., Шенгер А. Орогенез. – М., 1985. – 286 с.

