

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕСТРУКЦИИ ЛИТОСФЕРЫ НА ПРИМЕРЕ ГИМАЛАЙСКОЙ ЗОНЫ СЖАТИЯ**К.Ж. Семинский***Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск*

Закономерности современного структурообразования в Центральной Азии рассмотрены на основе представлений тектонофизики о разделении деформируемого объема на блоки разноориентированными дизъюнктивными структурами, которые, кроме длины и глубины, характеризуются значимой шириной. Впервые для рассматриваемого региона составлена карта зонно-блоковой структуры литосферы (м-б 1 : 15 000 000), на которой блоки контактируют друг с другом по широким зонам деструкции, выделяющимся высокой плотностью разломов и генетически связанных с ними землетрясений. Результаты анализа геометрических размеров и степени активности деструктивных зон позволили установить строгую иерархию процесса деструкции и оконтурить в пределах континента Гималайскую зону взаимодействия Индостанской и Евразийской плит как объекта 1-го ранга для проведения более углубленных исследований. Показано, что зонно-блоковая структура Гималайской зоны деструкции образовалась как закономерный итог эволюции разломных зон, которые на очередном этапе порангового развития соединились друг с другом с образованием непрерывной сети и, таким образом, трансформировались в зоны деструкции, дальнейшее развитие или активизация которых происходят под существенным влиянием движений обособившихся блоков. Именно поэтому главные закономерности структурообразования в Гималайской зоне сжатия, выявленные посредством анализа зонно-блоковой структуры, не только не противоречат тем результатам, которые были получены ранее на основе представлений о вязком течении субстрата региона под нагрузкой, но и дополняют их рядом специфических деталей. На основе количественной обработки сейсмологических и, частично, геолого-структурных данных выявлены обобщенные процентные соотношения вкладов элементарных динамических обстановок в формирование внутренней структуры зон сжатия, растяжения, сдвига, сжатия со сдвигом и растяжения со сдвигом. В соответствии с ними Гималайская зона деструкции формируется в режиме сжатия со сдвигом, что в отличие от явно выраженной транспрессии обусловлено инденторным характером унаследованно развивающегося контактирования двух литосферных плит. Деструктивные зоны 2-го и 3-го рангов, входящие в парагенезис собственно сжатия, локализуются вблизи северной и южной границ Гималайской зоны и своей ориентировкой, особенностями внутреннего строения и набором динамических обстановок формирования свидетельствуют о зрелой стадии ее развития с наклонным положением активной оси тензора напряжений. Парагенезис сдвига охватывает центральную и, главным образом, восточную часть зоны, отражая широко известный процесс перемещения вещества из области наибольшего сжатия за фронтальную границу Индостанского блока. В целом характер деструкции литосферы определяется не только 1) интенсивностью и направленностью внешнего воздействия, 2) структурой, составом и размерами деформируемого объема, но и 3) законами активного взаимодействия блоков и деструктивных зон друг с другом. Главными из них являются существование пространственно-временной неравномерности процесса, конкретными выражениями которой служат вариации в пространстве и времени степени активности и динамических обстановок даже в однородно нагруженных объемах, а также ранговая соподчиненность в зонно-блоковой структуре литосферы.

Ключевые слова: тектонофизика, деструкция литосферы, зона сжатия, Гималаи, Центральная Азия.

ВВЕДЕНИЕ

Образование разрывов, разделяющих тело на отдельные блоки, является наиболее общей тектонофизической закономерностью разрушения (деструкции) литосферы [11], формы выражения которой имеют существенные отличия на разных уровнях организации вещества. При хрупком разрушении деление субстрата на блоки отчетливо проявляется в

виде вычленения ненарушенных участков коренного выхода системами пересекающихся трещин. С увеличением пространственно-временных масштабов процесса рассматриваемая закономерность становится менее выраженной в связи с неоднозначностью проведения непрерывных разломных ограничений блоков. Процесс активного разломообразования перестает быть узколинейным и в значительной

степени охватывает краевые части контактирующих блоков.

Данная особенность деструкции нашла отражение в предложенной М.А. Садовским модели геофизической среды [10], где, наряду с блоками, в качестве объемных структурных элементов предложено выделять и окружающие их зоны пониженной (в результате высокой раздробленности) вязкости субстрата. На “разломном уровне” деструкции это согласуется с представлениями об областях динамического влияния разломов [22] – геологических телах, характеризующихся (кроме длины и глубины) значимой шириной, которая, согласно экспериментальным данным, существенно возрастает с увеличением толщины деформируемого слоя. В свою очередь, в областях новейшего тектогенеза поперечные размеры поясов распространения активных разломов вдоль границ плит и микроплит измеряются сотнями километров [18, 27].

Таким образом, теоретические, экспериментальные и натурные исследования свидетельствуют о необходимости выделения в качестве полноправного элемента деструкции литосферы не пограничных разломных сместителей, а широких зон контактирования блоков. К построениям подобного типа следует отнести региональные схемы линейно-вытянутых, сочленяющихся друг с другом аномалий металлогенической или геофизической природы [9, 20], которые отражают существование областей динамического влияния разломов, рассекающих отдельные слои земной коры. Однако первостепенный интерес в плане геодинамических реконструкций имеют аналогичные построения, сделанные на тектонической основе и охватывающие более значительные объемы литосферы.

В связи с этим целью проведенного исследования стало выявление тектонофизических закономерностей деструкции континентальной литосферы, обусловленных взаимодействием относительно стабильных блоков и окружающих их подвижных зон. В качестве основного объекта исследований была выбрана территория Центральной Азии, а точнее – часть Альпийско-Гималайского подвижного пояса, внутренняя структура которой активно формируется в настоящее время при коллизии Евразийской и Индостанской тектонических плит (блоков 1-го ранга) [16].

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ

Первоочередной задачей исследования являлось построение карты делимости литосферы Центральной Азии, отличием которой от известных для данной территории блоковых карт и схем [2, 3, 5, 7, 23, 31, 36, 37, 41] стало оконтуривание, ранжирова-

ние и геодинамическая характеристика подвижных зон, существование которых для рассматриваемого региона отмечалось и ранее [18]. Работа связана с определенными трудностями, которые отчасти обусловлены большой мощностью деформируемого слоя, что увеличивает ширину подвижных зон и рассеивает проявления активности в их пределах. Кроме того, наряду с вновь образованными подвижными зонами, в современном поле напряжений обычно активизируются структурные неоднородности разного типа (древние подвижные зоны, зоны контакта контрастных по физико-механическим свойствам комплексов пород и др.), которые для некоторых блоков играют роль объемных структурных границ. Поэтому участки континентальной литосферы, характеризующиеся повышенной раздробленностью, сложностью напряженного состояния и, как правило, интенсивной современной сейсмичностью, мы, вслед за С.И. Шерманом [25, 26], будем называть деструктивными зонами и выделять в качестве второго (в дополнение к блокам) главного структурного элемента делимости литосферы.

Построения проводились на основе сети разломов с “Международной тектонической карты мира” [29]. В оригинале они не разделены по возрасту, однако, согласно недавним исследованиям М.Л. Коппа [6], практически все тектонические нарушения данной территории были активизированы в новейшее время. Это позволяет считать проведенные по карте [29] построения соответствующими современной эпохе тектогенеза.

Прежде всего, на тектонической карте выявлялись наиболее протяженные непрерывные сместители. В подавляющем большинстве случаев каждый из них сопровождается серией близко расположенных, часто субпараллельных, более коротких сопутствующих разломов, которые и составляют внутреннюю структуру выделяемой зоны деструкции. Проведение внешних границ зоны для сейсмически активных территорий контролировалось по “Карте полей напряжений мира” [43] путем анализа площадного распределения сильных землетрясений. В спорных случаях привлекалась дополнительная информация по активной разломной структуре регионов, взятая из других источников (например, [2–6, 8, 15–19, 24, 27, 28, 30–34, 36–40, 42]).

В итоге была составлена “Карта зонно-блоковой структуры литосферы Центральной Азии” (1 : 15 000 000), на которой блоки контактируют между собой по широким зонам деструкции, сочленяющимся друг с другом с образованием замкнутой сети (рис. 1А). В пределах большинства зон можно выделить магистральный разломный сместитель, являющийся формальной границей блока. В каче-

стве сегментов таких сместителей на карте нашли отражение все известные крупные разломы региона (Инд-Цангпо, Айлао-Шань, Алтын-Таг, Гиссаро-Кокшисальский, Тянь-Лу, Чаман-Мокур и другие), чье присутствие в сочетании с более мелкими разрывами и землетрясениями делает проведение границ соответствующих деструктивных зон наиболее обоснованным. В противоположность этому выделение некоторых деструктивных зон (например, № 15, 16, 54) из недостаточно исследованных регионов со слабой сейсмической активностью имеет более низкую достоверность. Однако это не повлияло на результаты проведенного исследования, т.к. основной акцент при их получении был сделан на анализе внутреннего строения достаточно изученной территории Гималаев и их предгорий, где происходит активное разломообразование, сопровождающееся интенсивной сейсмичностью.

ЗОННО-БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Для выявления наиболее общих особенностей делимости литосферы Центральной Азии анализировались геометрические размеры и степень современной активности показанных на карте (рис. 1А) деструктивных зон и блоков. Как и ожидалось по предыдущему опыту работы с параметрами крупных дизъюнктивов [24], выделение масштабных рангов зон по отдельно взятым распределениям их длины или ширины не привело к положительным результатам. Как и отсутствие корреляционной связи между данными количественными характеристиками, это объясняется активным взаимодействием зон деструкции друг с другом и с субгоризонтальными границами блоков на глубине, что (в отличие от ситуации с сравнительно обособленно развивающимися дизъюнктивами меньшего масштаба) и порождает дисбаланс их основных параметров. Лишь при анализе распределения площадей (рис. 1Б), которые учитывают обе характеристики и, следовательно, в большей степени отражают количество полученной от источника тектонических сил энергии, деструктивные зоны были разделены на два ранга.

Анализ пространственного распределения разноранговых деструктивных зон свидетельствует о строгой иерархической соподчиненности в картине блоковой делимости литосферы Центральной Азии (рис. 1А). Деструктивные зоны 2-го ранга ограничивают одноранговые блоки, каждый из которых разделен на более мелкие блоки зонами 3-го ранга. В плане деструктивные зоны обычно имеют изогнутую форму, что является следствием их формирования путем объединения более мелких, сравнительно прямолинейных сегментов, которые часто развиваются в несколько отличающихся условиях

нагружения. У зон 2-го ранга эти сегменты по размерам обычно соответствуют деструктивным зонам 3-го ранга, причем в литературе они рассматриваются как обособленные дизъюнктивные структуры. Примерами являются известная сегментация Байкальской рифтовой системы [3, 8, 24] или соответствие сегментов зоны № 8, выделенных Ма Синюанем [31], отдельным поясам разломов: № 8-1 – Северный Цилян-Шань; № 8-2 – Хайюань; № 8-3 Северный Кунь-Лунь – Северный Хуайян. Всего на изучаемой территории была выявлена 61 деструктивная зона. Однако при анализе структур 2-го ранга рассматривалось 19 зон, а 3-го ранга – 79 объектов, из которых 42 принадлежат к самостоятельным зонам 3-го порядка и 37 являлись аналогичными по рангу сегментами наиболее извилистых зон 2-го порядка (рис. 1).

Таким образом, теоретическая модель академика М.А. Садовского находит реальное отражение в качественной картине делимости литосферы Центральной Азии. Иерархическая соподчиненность разноранговых структур на количественном уровне хорошо подтверждается результатами анализа площадных характеристик деструктивных зон, тогда как аналогичные расчеты по блокам не дали однозначных результатов. Так, оконтуренные одноранговыми зонами блоки образуют законченную сеть, но не попадают в одну группу по среднегеометрическому размеру, что может быть связано с незавершенностью деструктивного процесса на большей части территории Центральной Азии.

Степень активности выделенных зон деструкции в современном поле напряжений весьма различна, если судить по материалам цитированных публикаций о составляющих их внутреннюю структуру крупных разломах. Для проведения сравнительного анализа на количественной основе в качестве показателя степени активности деструктивных зон использовалось число сильных землетрясений, происходящее на единицу их площади. Такая оценка вполне правомерна и даже более оправдана, чем проведение аналогичной процедуры по отношению к разломам, т.к. привязка гипоцентров к конкретному сместителю в большинстве случаев вызывает серьезные трудности. При отсутствии универсального показателя современной активности территорий (учитывающего величины выделенной сейсмической энергии, энергию криповых перемещений по разломам и т.д.) этот параметр ввиду простоты определения наиболее удобен для применения, т.к. в самом первом приближении позволяет судить об относительной степени активности деструктивных зон. Для решения задач настоящего исследования, где не абсолютизируется прямое сопоставление значе-

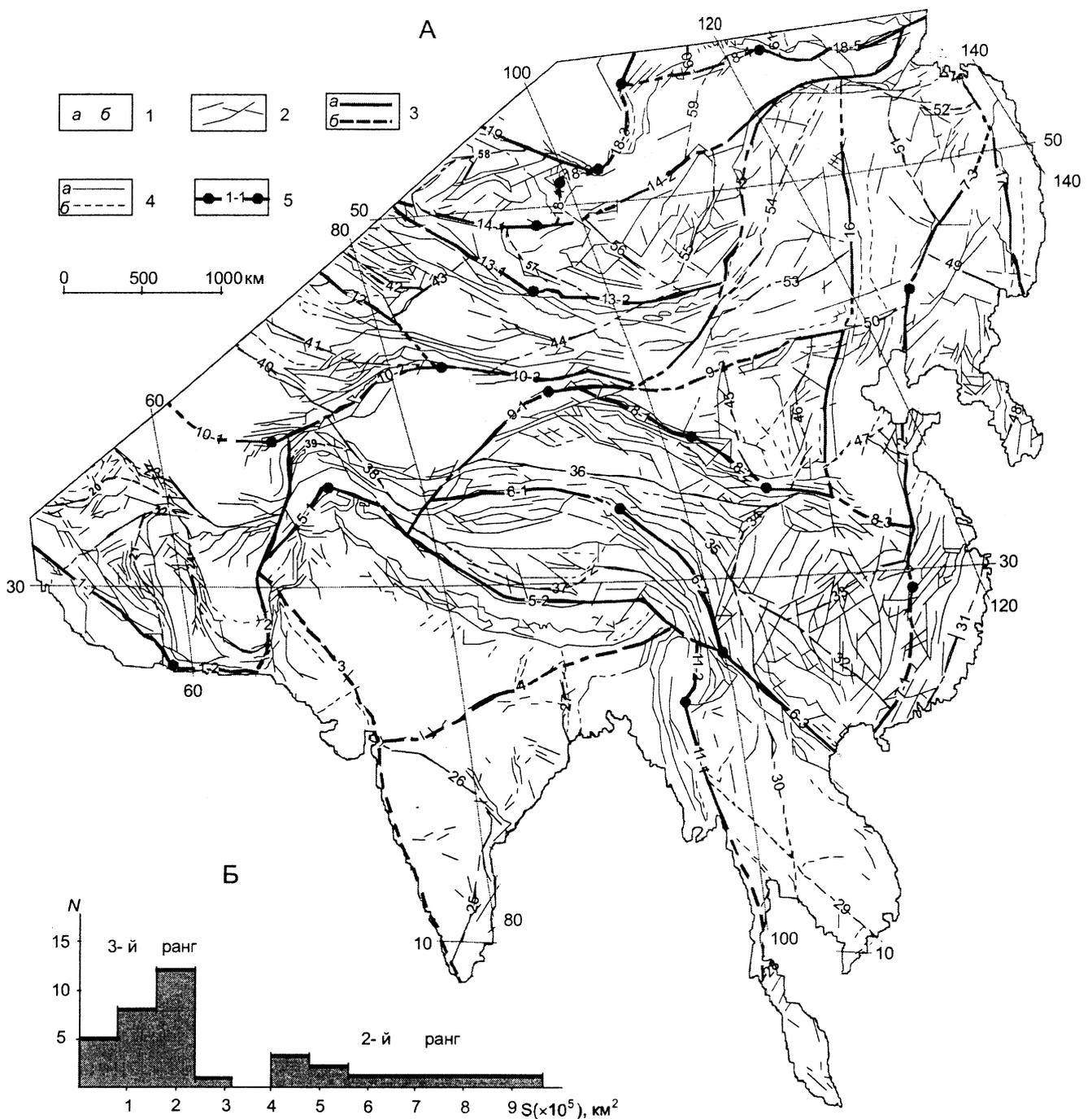


Рис. 1. Карта зонно-блоковой структуры литосферы Центральной Азии (А) и гистограмма площадей ($N=f(S)$) показанных на ней деструктивных зон (Б).

1 – площади, занимаемые деструктивными зонами (а) и блоками (б); 2 – разломы по карте [29]; 3,4 – магистральные сместители деструктивных зон 2-го (3) и 3-го (4) рангов, совпадающие (а) и несовпадающие (б) с разломами; 5 – индексация деструктивных зон и их сегментов.

ний параметра для отдельных зон, его использование является удовлетворительным, хотя в перспективе планируется учет и других характеристик активности.

Подсчеты проводились по материалам карты полей напряжений, составленной по достаточно

формализованным критериям [43]. Гистограмма распределения показателя удельной плотности землетрясений (рис. 2Б) позволяет разделить 79 объектов на пять групп с разной степенью активности. Значения показателей из двух первых групп характеризуются слабой достоверностью (1 группа – 0, а

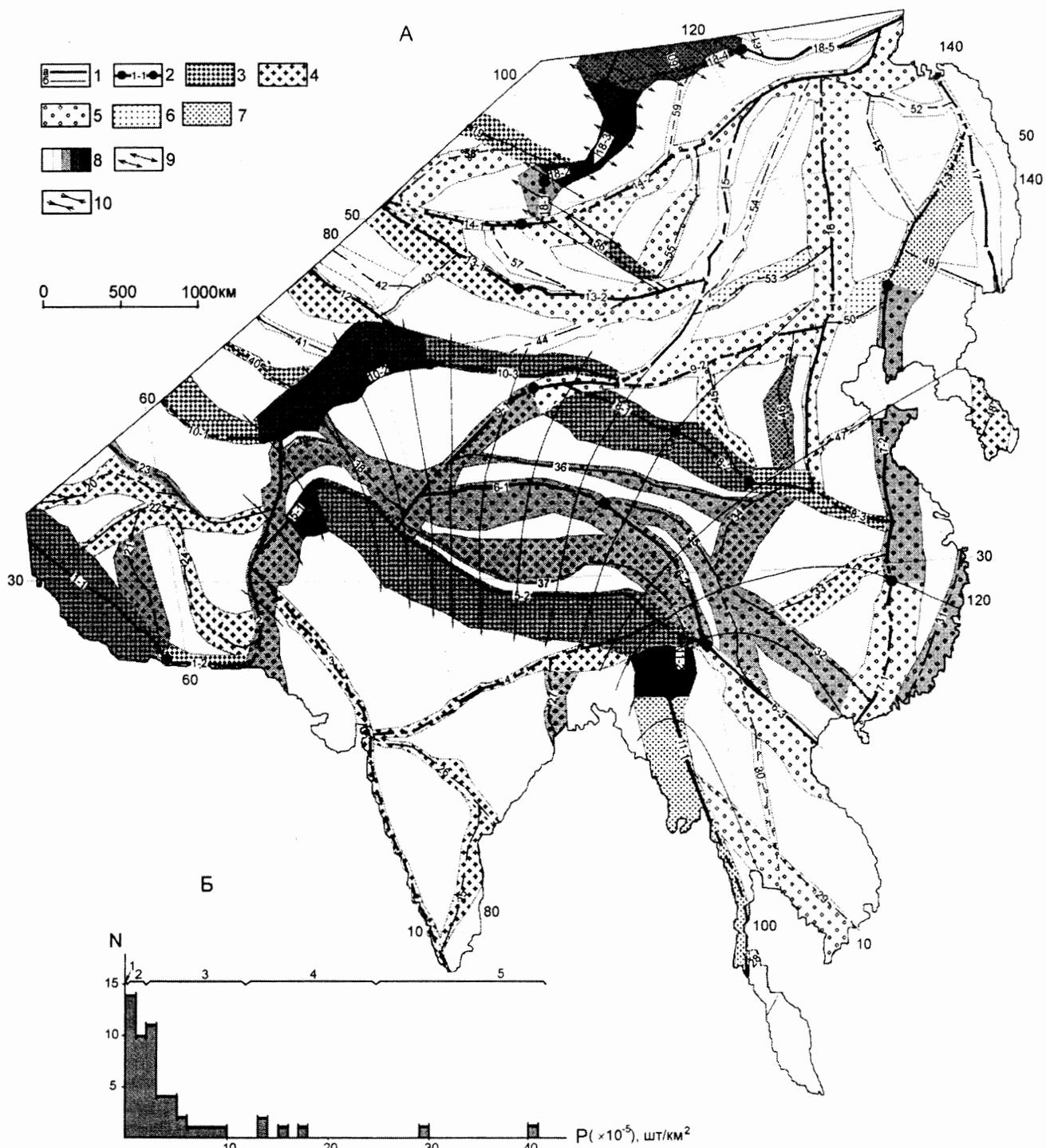


Рис. 2. Схема разделения деструктивных зон Центральной Азии по типам динамических обстановок формирования и степени активности (А) и гистограмма показателя активности зон ($N=f(P)$), представляющего собой взвешенное к их площади количество сильных землетрясений (Б).

1 – магистральные сместители деструктивных зон 2-го (а) и 3-го (б) рангов; 2 – индексация деструктивных зон и их сегментов; 3–7 – динамические обстановки формирования внутренней структуры деструктивных зон: 3 – сжатие, 4 – сжатие со сдвигом, 5 – сдвиг, 6 – растяжение, 7 – растяжение со сдвигом; 8 – степень активности деструктивных зон в соответствии с пятью выделенными по гистограмме группами; 9 – траектории главных нормальных напряжений растяжения (горизонтальная проекция), показанные в пределах участка активных современных деформаций, обусловленных развитием Байкальско-го рифта; 10 – траектории главных нормальных напряжений сжатия (горизонтальная проекция), показанные в пределах Гималайской зоны деструкции.

2 группа – 2 и менее сильных событий на зону), отделяются на графике четким минимумом и в ходе дальнейшего анализа были отнесены к фоновым. Это позволило оконтурить в пределах Центральной Азии две неодинаковые по размерам области, внутренняя структура которых состоит из взаимодействующих друг с другом деструктивных зон со средней (3 группа) и высокой (4-5 группы) степенями активности (рис. 2А).

Большая из областей выделена на рис. 2А траекториями главных нормальных напряжений сжатия и протягивается вблизи южной окраины континента от Тихого океана до западной оконечности Индостана на 4.5 тыс. км. Она была названа Гималайской зоной сжатия (1-го ранга), т.к. именно здесь, согласно проведенным построениям, происходит в настоящее время интенсивное деформирование континентальной литосферы, обусловленное коллизией Евразийской и Индостанской тектонических плит (1-го ранга). Наиболее активно деструкция протекает в зонах 2-го и 3-го рангов, располагающихся перед фронтом Индостанского блока, отчетливо тяготея к его выступающим на север частям: районы хребтов Тянь-Шань (зона № 10–2) и Нага (зона № 11–2). Процесс разрушения затронул здесь даже внутриблоковые пространства, о чем свидетельствует локализация в их пределах некоторых крупных землетрясений. Наименьшие деформации свойственны дистальным окончаниям зоны сжатия в областях ее перехода к Аравийскому сегменту Альпийско-Гималайского подвижного пояса (западнее зоны № 2) и сочленения с активной Тихоокеанской окраиной (восточнее зон № 34, 46).

Значительно меньший по размерам участок активных деформаций литосферы, показанный на рис. 2А траекториями главных нормальных напряжений растяжения, располагается на севере изучаемой территории и связан с формированием Байкальского рифта в пределах Саяно-Байкало-Становой горной области. Для него характерно существование наиболее простого вида неравномерности в проявлениях процесса деструкции, когда степень активности возрастает от дистальных окончаний к центру. Пространственная разобщенность выделенных областей, различия во времени начала движений и характере распределения активности в пространстве свидетельствуют в пользу предположения об их формировании под воздействием двух разных энергетических источников [3].

В целом деструкция литосферы Центральной Азии, по-видимому, обусловлена функционированием трех долгоживущих источников тектонических сил, каждому из которых можно поставить в соответствие деструктивные зоны 1-го ранга, развивающиеся сейчас в различных геодинамических режи-

мах: Гималайская зона сжатия с показанными на карте границами; Западно-Тихоокеанская зона, активные транспрессивные деформации в пределах которой затрагивают лишь окраинную часть континента; Саяно-Байкало-Становая зона древнего заложения, локальная активизация которой происходит в режиме растяжения.

Рассматриваемые построения (рис. 2А) позволяют отметить характерные особенности взаимодействия наиболее полно представленной в исследуемом регионе Гималайской зоны сжатия с двумя другими зонами 1-го ранга. Наблюдается значительное увеличение ее поперечных размеров в области контактирования с Западно-Тихоокеанской зоной деструкции. В то же время, причиной активизации самых северных структур этой области (№ 46 и № 7–2) может быть и тенденция к сочленению с Саяно-Байкало-Становой зоной через активную зону деструкции № 56, ответвляющуюся от южного конца Байкальской рифтовой системы в нехарактерном для последней юго-восточном направлении. Этот пример иллюстрирует один из экспериментально установленных путей эволюции разломно-блоковой структуры [14], заключающийся в разрушении блока под действием усиливающейся нагрузки.

То же проявляется на более высоком иерархическом уровне в центральной части Гималайской зоны деструкции, где интенсивное сжатие приводит к расширению деструктивных зон, которые в поверхностном выражении становятся подобны располагающимся рядом блокам. Таким образом, неравномерность процесса деструкции обуславливает существенные отличия в среднегеометрических размерах блоков, ограниченных одноранговыми зонами, но располагающихся в разных местах структуры 1-го ранга. Как показал количественный анализ, эти различия свойственны, главным образом, Гималайской зоне сжатия, зонно-блоковая структура которой находится в стадии активного формирования, тогда как на остальной территории Центральной Азии параметры блоков более сбалансированы. Поэтому можно предположить, что эта сбалансированность является свойством интегральной картины делимости литосферы, тогда как в отдельные, сравнительно короткие (в геологическом масштабе времени) этапы перестройки структуры наблюдаются существенные отклонения от генеральной закономерности.

В целом результаты изучения геометрических размеров и степени активности выделенных в Центральной Азии деструктивных зон свидетельствуют о строгой иерархической соподчиненности процесса деструкции в природе как по вертикали, когда любой структурный элемент состоит из элементов

меньшего ранга, так и по горизонтали, когда на одном уровне организации вещества одноранговые блоки контактируют друг с другом вдоль деструктивных зон того же (или большего) масштабного ранга. С другой стороны, детали процесса деструкции (в т.ч. и выраженные в соотношении параметров отдельных структурных элементов) в значительной мере зависят от стадии и условий деформирования, варьирующих для крупных объемов литосферы в пространстве и времени. Из выделенных деструктивных структур 1-го ранга Гималайская зона лучше других подходит для выведения закономерностей общего плана, так как ее

зонно-блоковая структура длительное время и в полном объеме развивалась в едином геодинамическом режиме.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕСТРУКЦИИ В ГИМАЛАЙСКОЙ ЗОНЕ СЖАТИЯ

Один из главных параметров деструкции – степень активности процесса – уже рассматривался выше на основе сравнительного анализа удельных плотностей землетрясений в деструктивных зонах. Сделанный вывод о неравномерности деструкции в пределах Гималайской зоны сжатия подтверждается

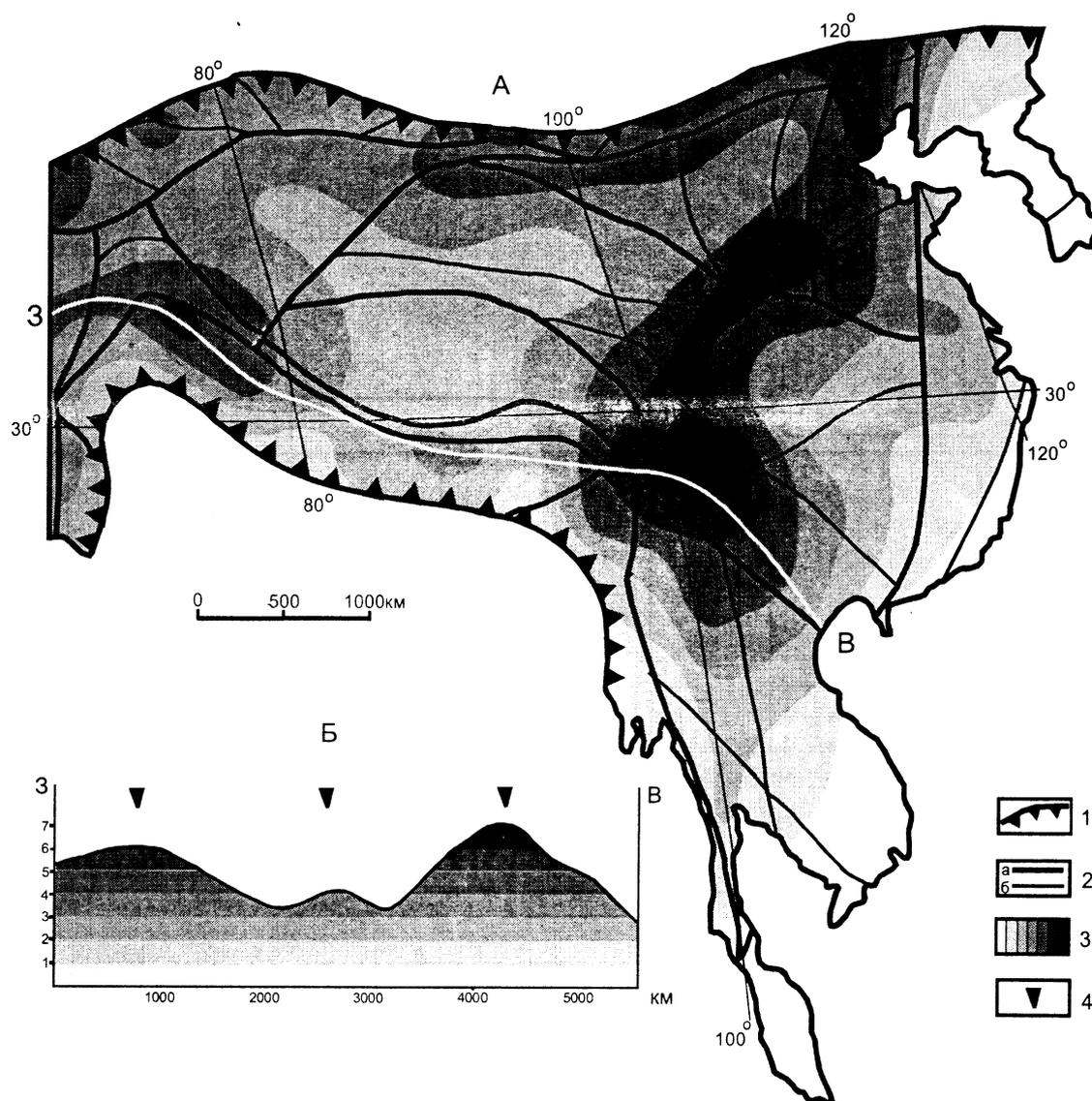


Рис. 3. Площадное распределение магистральных сместителей деструктивных зон 2-го и 3-го рангов в Гималайской зоне сжатия (А – карта в изолиниях; Б – разрез по линии “Запад-Восток”).

1 – северная и южная границы Гималайской зоны деструкции в пределах континента; 2 – магистральные сместители 2-го (а) и 3-го (б) рангов; 3 – области с различной плотностью сместителей в порядке возрастания параметра; 4 – положение максимумов на профиле 3-В.

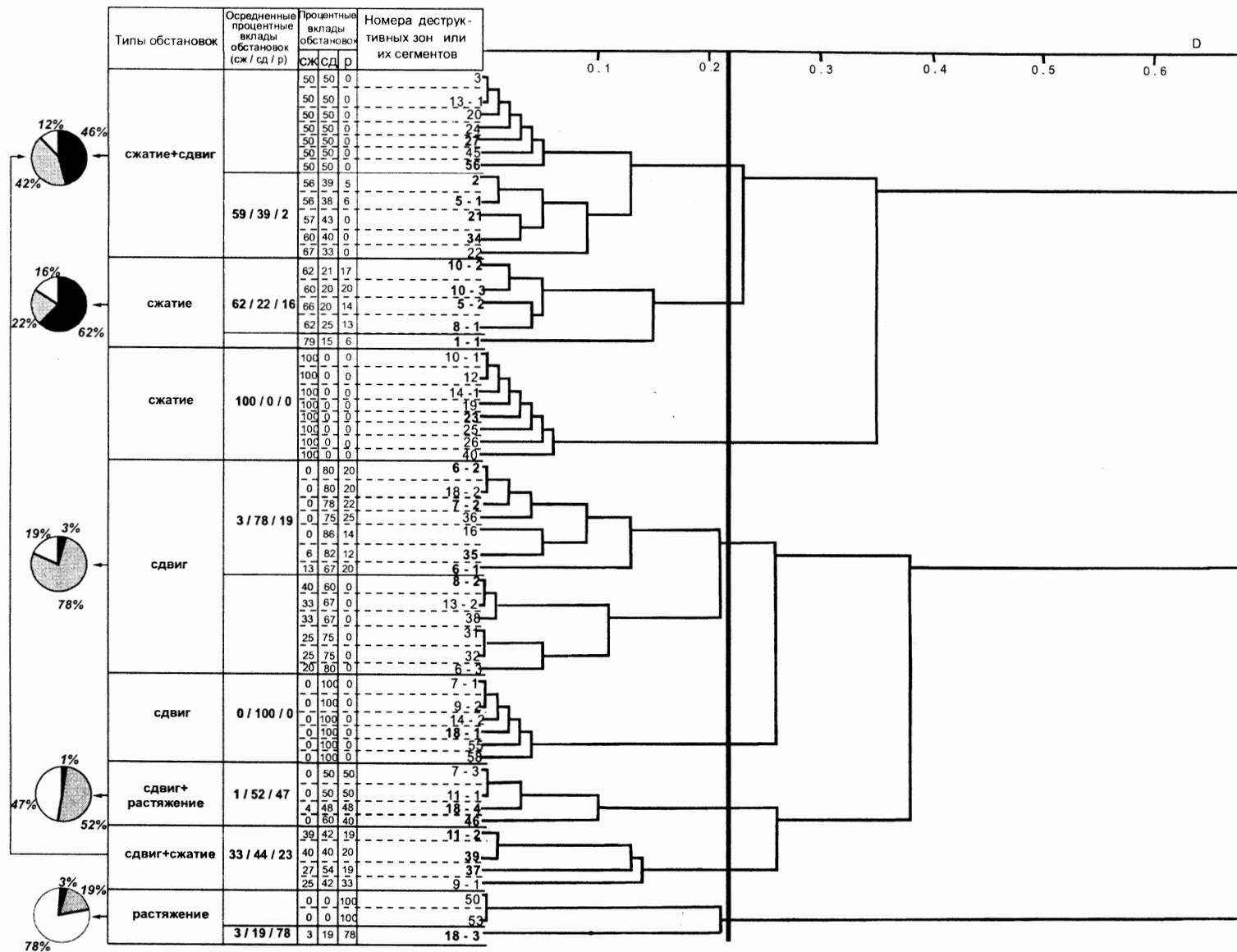


Рис. 4. Результаты кластер-анализа, позволяющие разделить деструктивные зоны Центральной Азии (даны цифры согласно рис. 1А) на пять групп по динамической обстановке формирования их внутренней структуры.

Итоговые соотношения вкладов сжатия (черный цвет), сдвига (серый цвет) и растяжения (белый цвет) для каждой из ключевых обстановок показаны на круглых диаграммах и определялись по данным о наиболее представленных землетрясениях зонах (жирные цифры), совокупности которых отчетливо выделяются при значении показателя $D=0,22$.

при изучении пространственного распределения зон, аппроксимируемых в данном случае как линейные границы блоков. На рис.3А представлена карта их плотности, построенная стандартным способом при использовании скользящей палетки с круглым окном, диаметр которого определялся по методике [21]. Несмотря на учет в построениях дизъюнктивных границ только двух масштабных рангов, стиль нарушения субстрата Гималайской зоны сжатия проявляется довольно отчетливо. Простиранием изолиний, а также цепочками максимумов подчеркиваются не только южная и северная границы, но и область ее сочленения с Западно-Тихоокеанской зоной деструкции. Центральную часть зоны сжатия занимает крупный минимум.

Продольная неравномерность нарушения субстрата наиболее отчетливо видна вблизи южной границы зоны сжатия. На профиле (рис. 3Б), проходящем здесь по серединам максимумов плотности, последние, чередуясь с минимумами, располагаются примерно на одинаковых расстояниях друг от друга. Эта особенность разрушения может, по-видимому, рассматриваться в качестве отражения одной из наиболее общих закономерностей продольного распределения деформаций, выявленной ранее на примере крупных разломных зон [12, 24]. В данном случае она осложняется специфическими чертами, связанными с формой Индостанского блока: южная граница зоны деструкции повторяет очертания последнего, причем к выступающим на север участкам приурочены регионы наибольшей тектонической активности, выраженной в максимумах плотности сильных землетрясений (рис. 2А), деструктивных зон (рис. 3А) и активных разломов (рис. 1.11 из [24]).

Динамическая обстановка формирования внутренней структуры является еще одной важной характеристикой процесса деструкции в Гималайской зоне, так как поле напряжений в ее пределах подвержено определенным пространственным вариациям на фоне генерализованного сжатия. Их главные особенности неизменно отражаются на всех картах осей напряжений, построенных для данной территории разными авторами с использованием существенно отличающихся исходных материалов [19, 31, 35], и в том числе – на схеме траекторий оси сжатия, составленной нами по результатам статистической обработки ориентировок осей напряжений, представленных на карте М.Л. Зобак [43]. Как видно из рис. 2А, в целом поле напряжений Гималайской зоны деструкции определяется субмеридиональной ориентировкой оси сжатия в центральной части с отклонениями (и даже загибом на востоке) у дистальных окончаний, обусловленными влиянием формы северной

границы Индостанского блока. В то же время, отдельные сейсмические события, а также характер движений по некоторым достаточно крупным тектоническим нарушениям региона не согласуются с представленной генеральной картиной.

Для выявления иерархических взаимоотношений динамических обстановок при деформации вещества в Гималайской зоне сжатия были рассмотрены их особенности в деструктивных зонах более мелкого масштаба. Процентные вклады обстановок сжатия, растяжения и сдвига в формирование внутренней структуры показанных на рис.1А деструктивных зон (и их сегментов) вычислялись для каждого объекта по материалам карты [43], где механизмы очагов землетрясений уже разделены по упомянутым элементарным типам. Далее деструктивные зоны группировались по сходству-различию этих вкладов с использованием кластер-анализа в его Ward-модификации (рис. 4).

Интерпретация дендрограммы проводилась на основе опыта предыдущих исследований [24], а также имеющихся литературных и собственных данных о динамических обстановках в пределах хорошо изученных (эталонных) деструктивных зон. В итоге все объекты были разделены на пять групп, отвечающих ключевым динамическим обстановкам (рис. 2А, рис. 4), причем обобщенные процентные вклады сжатия, сдвига и растяжения в каждую из них вычислялись как средние арифметические по подгруппам, в которые входили только эталонные и наиболее представленные землетрясениями деструктивные зоны: сжатие – 62/22/16; сдвиг – 3/78/19; растяжение – 3/19/78; сдвиг со сжатием – 46/42/12; сдвиг с растяжением – 1/52/47. При этом все деструктивные зоны с известными обстановками формирования их главных сместителей находятся в соответствующих группах, в том числе: Гиссаро-Кокшаальский надвиг (№ 10–2) и взброс Инд-Цангпо (№ 5–2) – сжатие; сдвиг Канг-Тинг (№ 35) и сдвиг Тань-Лу (№ 7–2) – сдвиг; Приморский сброс (№ 18–3) – растяжение; взбросо-сдвиг Чаман-Мокур (№ 2), взбросо-сдвиг Сэйгаинг (№ 11–2) – сдвиг со сжатием; Верхнеангарский и другие сбросо-сдвиги (№ 18–4) – сдвиг с растяжением. Таким образом, можно считать объективно установленным, что даже в обстановках “чистых” сжатия, сдвига или растяжения суммарные вклады других динамических обстановок оказываются весьма значительными и варьируют от 20 до 40%. Отражением этого является активное существование во внутренней структуре деструктивных зон разломов разного морфогенетического типа на фоне преобладающего распространения нарушений одного генезиса.

Следует отметить, что определенные для зон деструкции процентные соотношения близки к формулам вкладов, полученным на основе анализа геолого-структурных данных для зон сжатия разломной природы в Юж.Тянь-Шане, Памире, Зап. Саяне [24] и для зон растяжения Байкальского рифта (расчеты по материалам спецкартирования из [13]): сжатие – 52/30/18; растяжение – 0/31/69. Такое соответствие не удивительно, т.к. в обоих случаях анализировались явления, происходящие при формировании примерно одноранговых структур. В этой связи следует в дальнейшем сделать попытку получить обобщающие формулы для всех ключевых видов динамических обстановок, хотя полного совпадения вкладов, по-видимому, ожидать не следует ввиду различий в представительности материалов и типах вычисляемых по ним показателей. Для диагностики режимов формирования деструктивных зон большая эффективность свойственна сейсмологическим определениям в связи с относительной формализованностью и быстротой их получения.

Так, соотношение вкладов, полученное по сейсмологическим данным для большей из выделенных на рис.2А областей, составляет 48/38/14. Следовательно, Гималайская зона деструкции не является структурой “чистого” сжатия, а принадлежит к зонам промежуточного типа – сжатие со сдвигом. Главной причиной соизмеримости первых цифр формулы является наличие в пределах рассматриваемой территории двух крупных парагенезисов деструктивных зон, соответствующих разным динамическим обстановкам деформирования субстрата: собственно сжатия (55/31/14) и сдвига (15/71/14). Второй парагенезис образуется, главным образом, сближенными в пространстве зонами сдвигового типа (№ 36 – Кунь-Лунь, №35 – Канг-Тинг, № 6–3 – Айлао-Шань, №30 – Диен-Биен и другими) и является известным [6, 17, 24, 32, 34, 36] результатом взаимодействия Индостана и Евразии, когда часть субстрата из центральной части области сжатия перемещается на восток в область с меньшим давлением. Наличие данного явления полностью соответствует описанному выше характеру поля напряжений с существенным отклонением траекторий оси сжатия от субмеридиональной ориентации (рис. 2А).

Другая причина большого вклада обстановок сдвига в формирование внутренней структуры Гималайской зоны деструкции может быть выявлена при совместном анализе ориентировок и типов деструктивных зон, оставшихся собственно в парагенезисе сжатия. Они образуют следующие группы: азиат мут простирания 300° (№ 5–2, 10–3, 8–1 и др.) – зоны

сжатия; 65° (№ 5–1, 9–1, 34 и др.) и 355° (№ 27) – зоны сжатия со сдвигом; 20° (№ 46) – зоны сдвига с растяжением; 30° (№ 7–1, 7–2 и др.) – зоны сдвига, куда входят и две зоны промежуточного типа (№ 2 и 11–2), являющиеся заходящими на континент трансформами. Такое сочетание направлений деструктивных зон определенных типов действительно характерно для обстановки сжатия, но не с горизонтальным, а наклонным положением активной оси (приблизительно 25° в соответствии с механизмами очагов многих сильных землетрясений в Гималаях). Последнее в основном свойственно заключительным стадиям развития зон сжатия [24], когда главные сместители в продольно ориентированных деструктивных зонах выполаживаются, превращаясь в надвиги, а разломы в зонах деструкции других направлений приобретают существенную сдвиговую компоненту вследствие необходимости реализации больших горизонтальных перемещений.

ВЫВОДЫ

Анализ распределения разломов и генетически связанных с ними землетрясений позволил установить, что закономерности деструкции литосферы Центральной Азии определяются взаимодействием относительно стабильных блоков по ограничивающим их зонам активного структурообразования, существующим на различных уровнях организации вещества и находящихся в строгой иерархической соподчиненности. Долговременное функционирование трех разных энергетических источников привело к возникновению и дальнейшему развитию в изучаемом регионе деструктивных зон 1-го ранга: Гималайской, Саяно-Байкало-Становой и Западно-Тихоокеанской. Очевидно, что динамические обстановки их формирования, геометрические размеры, форма и степень активизации различались в отдельные этапы тектогенеза в зависимости от временной эволюции энергетических источников и их взаимоотношений в глубинах верхней мантии.

В настоящее время на континенте наиболее активно и полно процесс деструкции протекает в Гималайской зоне, причем ее внутренняя структура развивается однонаправленно в результате длительного существования одного геодинамического режима. Ширина зоны в целом имеет тенденцию к значительному увеличению с запада на восток, что отчасти связано с активизацией процесса деструкции на большой площади при контактировании с Западно-Тихоокеанской зоной и наметившейся тенденцией ее пространственного сочленения с Саяно-Байкало-Становой зоной.

Главным же фактором, определяющим форму Гималайской зоны деструкции, является специфика

контакта литосферных плит. Движение к северу сравнительно небольшого Индостанского блока создает узкую область высокого давления перед его фронтом и менее нагруженные широкие участки по краям. В таких сложных условиях сжатия субстрат оказывается неравномерно дислоцированным, причем наибольшая активность процесса деструкции имеет место перед выступающими на север углами Индостана (районы Пенджабского синтаксиса и Асамского выступа), где локализуется несколько высокосейсмичных деструктивных зон. Субстрат здесь разделен на узкие, вытянутые в продольном направлении блоки, соизмеримые по размерам и форме с ограничивающими их деструктивными зонами.

Состояние внутренней структуры Гималайской зоны сжатия соответствует зрелой стадии развития с наклонным положением оси сжатия, когда в южной части уже обозначился единый магистральный сместитель надвигового типа. Гималайский фронт – на юге, взбросо-надвиги Тянь-Шаня, Цилинь-Шаня, Нань-Шаня и других деструктивных зон – на севере, имея в целом противоположные падения, создают условия для сокращения литосферы в направлении действия активной оси. Парагенезис сжатия дополняют субмеридиональные и субширотные зоны сдвига со сжатием, север-северо-восточные зоны сдвига с растяжением и северо-восточные зоны сдвига трансформного типа, также тяготеющие к южной и северной частям Гималайской деструктивной зоны. В центральной части последней субстрат деформируется в условиях сдвига, перемещаясь из области наибольшего сжатия на восток за фронтальную границу Индостанского блока, что обеспечивается право- и левосдвиговыми движениями по разломам в пределах локализуемых здесь деструктивных зон.

Сложившаяся ситуация отражается в соотношении вкладов обстановок сжатия, сдвига и растяжения (48/38/14), согласно которому Гималайская зона деструкции принадлежит к зонам сжатия со сдвигом. Причиной данного факта является “инденторный характер” контакта литосферных плит, а не процесс транспрессии, приводящий к аналогичному результату во многих геодинамических обстановках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, тектонофизический подход к исследованию процесса деструкции литосферы оправдал себя на примере Гималайской зоны сжатия. Некоторые из выявленных закономерностей отразили твердо установленные для данного региона особенности деструктивного процесса (вариации в ориентировках оси сжатия генерального поля напря-

жений, наличие области трансформации вещества с запада на восток и др.), другие стали дополнительным доказательством справедливости некоторых из обсуждающихся в литературе гипотез (обособленность главных энергетических источников деструкции в Гималайской зоне сжатия и Байкальской рифтовой системе, существование тенденции к пространственному соединению этих зон и др.), а третьи были установлены впервые как для Гималайской зоны сжатия, так и для деструктивного процесса в целом (положение современных латеральных границ зоны, состав парагенезиса более мелких деструктивных зон, процентные соотношения вкладов элементарных динамических обстановок в формирование внутренней структуры зон сжатия, растяжения, сдвига, сжатия со сдвигом, и растяжения со сдвигом). Это, с одной стороны, свидетельствует об объективности существования зонно-блокового строения литосферы Центральной Азии, а с другой, – о перспективности описанного направления исследований.

Эти исследования в дальнейшем должны проводиться с учетом влияния древней тектонической структуры природных регионов, оказывающей определенное влияние на положение новейших деструктивных зон и характер их дальнейшего активного развития. С другой стороны, Гималайский регион является одним из наиболее подходящих тектонотипов для подобных работ, т.к. процесс разрушения литосферы в его пределах происходил унаследованно под практически однонаправленным (хотя и прерывистым) тектоническим воздействием [1]. Зонно-блоковая структура, скорее всего, образовалась как закономерный итог эволюции разломных зон, которые на очередном этапе порангового развития соединяются друг с другом с образованием непрерывной сети [25, 26], трансформируясь, таким образом, в зоны деструкции, дальнейшее развитие или активизация которых происходят под существенным влиянием движений обособившихся блоков. Именно поэтому главные закономерности структурообразования в Гималайской зоне сжатия, выявленные посредством анализа зонно-блоковой структуры, не только не противоречат тем результатам, которые были получены ранее на основе представлений о вязком течении субстрата региона под нагрузкой [6, 17, 18, 32, 34], но и дополняют их рядом специфических деталей.

Кроме того, основные черты внутреннего строения деструктивных зон в данном случае во многом подобны выявленным ранее закономерностям структурообразования в разломных зонах литосферы [12, 24]: наличие сместителей магистрального типа, сходство парагенезисов структур 2-го порядка,

идентичность соотношений элементарных динамических обстановок, подобие характера неравномерности в распределении дизъюнктивных структур и др. Это позволяет выделенные деструктивные зоны (2-го и 3-го рангов) в первом приближении отождествлять с зонами влияния крупных разломов в их тектонофизическом понимании [22], что пока не может быть принято в качестве обобщающей закономерности. В этом плане ближайшей задачей является построение карт делимости литосферы для регионов с существенно отличающимися режимами развития, причем основой единого методического подхода должны быть следующие положения, отражающие опыт исследований в Гималайской зоне сжатия.

Процесс деструкции реализуется путем образования и совместного развития двух объемных структурных элементов – блоков и ограничивающих их зон, которые создают законченную картину делимости литосферы. Несмотря на большую интенсивность разрушения в деструктивных зонах, роль обоих элементов в структурообразовании равнозначна. Характер деструкции любого участка литосферы, таким образом, определяется не только 1) интенсивностью и направленностью внешнего воздействия, 2) структурой, составом и размерами деформируемого объема, но и 3) законами активного взаимодействия блоков посредством образования и развития деструктивных зон.

Перечисленные группы факторов влияют на все характеристики блоков и зон, но в разной степени. Интенсивность и направление действия внешних сил оказывают большее воздействие на степень активности и динамические обстановки формирования внутренней структуры, а реологические свойства и параметры деформируемого участка литосферы – на форму и размеры главных элементов деструкции.

Однако, несмотря на изменчивость внешних проявлений деструкции в зависимости от первых двух групп факторов, существуют общие закономерности формирования зонно-блоковой структуры литосферы, которые имеют повсеместное распространение. Во-первых, это пространственно-временная неравномерность процесса, конкретными выражениями которой служат вариации в пространстве и времени степени активности и типов динамических обстановок даже в однородно нагруженных объемах литосферы. Во-вторых, существование ранговой соподчиненности в зонно-блоковой структуре литосферы, количественные характеристики которой варьируют на разных стадиях структурообразования. В-третьих, наличие взаимозависимости в системе “блок-зона”, когда размеры и форма контактирую-

щих блоков обуславливают форму и характер напряженно-деформированного состояния субстрата пограничных зон деструкции (что особенно отчетливо проявляется в Гималайской деструктивной зоне 1-го порядка в окрестностях выдающихся на север участков Индостанской плиты), а степень активности и динамические обстановки процесса структурообразования в деструктивных зонах, в свою очередь, определяют аналогичные характеристики процесса внутри блоков.

Реальной перспективой исследований является создание зонно-блоковой модели континентов, органично согласующейся с закономерностями деструкции литосферы, наиболее твердо установленными в рамках различных геотектонических гипотез. Однако уже сейчас полученные результаты могут быть основой региональных геодинамических построений с выходом на прогноз характера протекания таких связанных с деструкцией процессов, как сейсмичность и рудообразование.

Автор благодарен профессору С.И.Шерману за обсуждение результатов проведенного исследования, а также ценные советы, сделанные в ходе их подготовки к публикации.

Работы выполнялись при финансовой поддержке СО РАН (№ В-3-00-28) и РФФИ (гранты № 00-15-98574, 01-05-64485).

ЛИТЕРАТУРА

1. Буртман В.С. Стационарная сеть разломов и мобилизм // Геотектоника. 1978. № 3. С. 26–37.
2. Гатинский Ю.Г. Латеральный структурно-формационный анализ. М.: Недра, 1986. 195 с.
3. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 205 с.
4. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979. 311 с.
5. Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизиином поясе. М.: Научный мир, 1997. 314 с.
6. Красный А.И. Геоблоки // Геотектоника. 1967. № 5. С. 103–120.
7. Леви К.Г. Неотектонические движения земной коры в сейсмоактивных зонах литосферы. Новосибирск: Наука, 1991. 166 с.
8. Пейве А.В. Глубинные разломы и их роль в строении и развитии земной коры: Избранные труды. М.: Наука, 1990. 352 с.
9. Рудоконцентрирующие структуры Азии и их металлогения / М.А.Фаворская, В.А.Баскина, Н.Л.Шилин и др. М.: Недра, 1983. 192 с.
10. Садовский М.А. О значении и смысле дискретности в геофизике // Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С. 5–14.
11. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 95 с.

12. Семинский К.Ж. Общие закономерности динамики структурообразования в крупных сдвиговых зонах // Геология и геофизика. 1990. № 4. С.14–23.
13. Семинский К.Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // Геология и геофизика. 1994. № 9. С. 112–130.
14. Соболев Г.А., Асатрян Х.О. Развитие иерархии разрывов при деформировании высокопластичного материала // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315, № 2. С. 345–348.
15. Тектоника Азии (материалы совещания). М.: ГЕОС, 1997. 272 с.
16. Трифонов В.Г. Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука, 1983. 224 с.
17. Трифонов В.Г. Взаимодействие континентальных плит в условиях сжатия // Тектонофизическое развитие земной коры и разломы. М.: Наука, 1979. С. 185–201.
18. Трифонов В.Г., Востриков Г.А., Трифонов Р.В. и др. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского пояса // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. С. 85–94.
19. Трифонов В.Г., Макаров В.И., Пономарев В.Г. Закономерности новейшего тектогенеза // Тектонические процессы. М.: Наука, 1989. С. 211–218.
20. Тяпкин К.Ф., Кивелюк Т.Т. Изучение разломных структур геолого-геофизическими методами. М.: Недра, 1982. 239 с.
21. Шерман С.И., Лобацкая Р.М. Методика изучения и опыт использования количественных параметров разрывов при геологических исследованиях. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1981. 62 с.
22. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
23. Шерман С.И., Черемных А.В., Адамович А.Н. Разломно-блоковая делимость литосферы: закономерности структурной организации и тектонической активности. Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1986. С. 74–77.
24. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 262с.; Зоны растяжения. Новосибирск: Наука, 1992. 228 с.; Зоны сжатия. Новосибирск: Наука, 1994. 263 с.
25. Шерман С.И. Деструктивные зоны литосферы, их напряженное состояние и сейсмичность // Неотектоника и современная геодинамика континентов и океанов. М.: ГЕОС, 1996. С. 157–158.
26. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. М.: ГЕОС, 1998. Т. 2. С. 277–279.
27. Шичжун Е. Региональные дизъюнктивные зоны Восточного Китая // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей. Новосибирск: Наука, 1990. С. 73–79.
28. Guoyu D. Seismotectonics research in China // Episodes. 1997. V. 20. P. 78–83.
29. International Tectonic Map of the World. (Scale 1:15000000) / Chief editor: V.E. Khain. M.: Mingeo, 1984.
30. Jiawei X., Guang Z., Weixing T., Kerei C., Qing L. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean // Tectonophysics. 1987. V. 134. P. 273–310.
31. Lithospheric dynamics map of China and adjacent seas. Scale 1:4000000 (with explanatory notes) / Chief compiler: Ma Xingyuan. Beijing: Geol. Publish. House, 1986.
32. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // Science. 1975. V. 189. P. 419–425.
33. Molnar P., Tapponnier P. Active tectonics of Tibet // Jour. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 5361–5374.
34. Peltzer G., Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: an experimental approach // Jour. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 15, 085–15,117.
35. Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Fursova E.V. II. Stress-monitoring: the modern field of regional stresses in South-East Asia and Oceania. Principles of quasiplastic deformation of fractured media // Jour. Earthquake Prediction Research. 1997. N 6. P. 11–36.
36. Schärer U., Tapponnier P., Lacassin R., Leloup P.H., Zhong D., Ji S. Intraplate tectonics in Asia: a precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan – Red River shear zone, China // Earth and Planetary Science Letters. 1990. V. 97. P. 65–77.
37. Sengor A.M.C. Plate tectonics and orogenic research after 25 years: A Tethyan perspective // Earth Sci. Rev. 1990. V. 27. P. 1–201.
38. Tapponnier P., Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of China // Jour. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 2905–2930.
39. Tapponnier P., Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of Tien Shan, Mongolia, and Baikal region // Jour. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 3425–3459.
40. Xi Xiwei, Deng Qidong. Nonlinear characteristics of paleoseismicity in China // Jour. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 6209–6231.
41. Zhao X., Coe R., Zhou Y., Hu S., Wu H., Kuang G., Dong Z., Wang J. Tertiary paleomagnetism of North and South China and a reappraisal of late Mesozoic paleomagnetic data from Eurasia: implications for the Cenozoic tectonic history of Asia // Tectonophysics. 1994. V. 235. P. 181–203.
42. Zhenhan W., Ganguo W., Jianping W. Constraints of the Mezo-Cenozoic global velocity field of lithosphere on the tectonic evolution of China and its adjacent areas // Episodes. 1997. V. 20. P. 117–121.
43. Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project // Jour. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 11, 703–11, 728.

K.Zh. Seminsky

Tectonophysical regularities of the lithospheric destruction as exemplified by the Himalayan compression zone

Regularities of recent structure formation in Central Asia are discussed on the basis of tectonophysical concepts of division of the volume under deformation into blocks by faults of variable orientations that are characterized by length, depth and width. A map of the zone-block structure of the lithosphere has been compiled for the region under study; it shows blocks contacting with each other in wide zones of destruction that are distinguished by high density of faults and associated earthquakes. From results of the analysis of geometrical sizes and degrees of activity of destructive zones, a strict hierarchy of destruction is revealed; within the limits of the continent the Himalayan zone of interaction of the Indostan and Eurasian plates has been mapped as the 1st rank target for further detailed research. It is established that the zone-block structure of the Himalayan zone resulted from the evolution of the fault zones that merged at a certain stage of the rank development to create a uniform network and, therefore, were transformed into destructive zones. The latter develop or are re-activated under substantial impact of movements of separated blocks. Thus, the main regularities of structure formation of the Himalayan compression zone, which have been established by the analysis of the zone-block structure, are in agreement with the results obtained earlier basing on the concepts of viscous flow of the substratum under loading in this region and provide additional specific details. From the quantitative processing of seismological and, in part, geological and structural data, generalized percentage ratios have been defined for contribution of elementary dynamic settings into the formation of the internal structure in the zones of compression, extension, shear, compression with shear, and extension with shear. According to these ratios, the Himalayan zone of destruction is formed under compression with shear. This, in distinction from the clearly manifested transpression, is predetermined by the indentor character of the inheritedly developing contact of the two lithospheric plates. Destructive zones of the 2nd and 3rd ranks, included in the paragenesis of compression proper, are localized at the northern and southern boundaries of the Himalayan zone; by orientation, peculiarities of the internal structure and the pattern of dynamic settings of their formation, these zones suggest that the Himalayan zone is mature, with its active axis of stress tensor being inclined. The paragenesis of the strike-slip fault involves its central and, largely, eastern parts, showing the well-known process of the material transfer from the area of the highest compression to the frontal boundary of the Indostan block. In general, the character of the lithospheric destruction is controlled not only by (1) the intensity and direction of the external impact, (2) structure, composition and dimensions of the volume under deformation, but also by (3) the laws of active interaction of blocks and destructive zones with each other. Major laws are the existence of spatial-temporal irregularity of the process, which is directly reflected in the temporal and spatial variations of the degree of activity and dynamic settings even in the homogeneously loaded volumes, and also the rank hierarchy of the zone-block lithospheric structure.