

УДК 551.24+528.481

## СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА АЗИИ: КАРТА, ПРИНЦИПЫ СОСТАВЛЕНИЯ, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

© 2009 г. К. Г. Леви, С. И. Шерман, В. А. Саньков

Институт земной коры СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128

Поступила в редакцию 12.04.2007 г.

Приводится новая “Карта современной геодинамики Азии”, принципы и методы ее составления и характеристика использованного фактического материала. Впервые в базовую основу карты положены три определяющих современную геодинамику параметра: толщина литосферы, напряженное состояние и векторы современных движений ее верхней хрупкой части. В качестве других факторов современной геодинамики показаны активные разломы и вулканы, эпицентры землетрясений с  $M \geq 6.0$ .

### ВВЕДЕНИЕ

Геодинамическое состояние верхней упругой части литосферы на современном этапе развития не является стабильным и простым. Ни одна из пространственных сегодня разнообразных по масштабам и принципам составления тектонических карт не позволяет конкретизировать нынешнюю тектоническую ситуацию, тем более на ее основе сделать важные для современного социума кратковременные прогнозы. Известные неотектонические карты и обзоры [6, 11, 15, 19–22, 24–26, 28, 29, 32, 33, 35, 46, 52, 67 и др.] казалось бы, достаточно полно представляют геодинамическую ситуацию для больших и малых по охвату площадей регионов, но геодинамическая информация на них носит, как правило, усредненный во времени характер. Продолжительная временная характеристика является неотъемлемой частью всех известных тектонических карт [14, 36; и др.]. Она важна для тектоники, отражает определяющие этапы геотектонического развития, без которых не мыслимы тектонические анализы и ретроспективные построения. Эти главные причины явились непререкаемыми основаниями для составления тектонических карт на базах по времени завершения геосинклинальных (складчатых) процессов. Великолепные примеры – Тектоническая карта Евразии под ред. акад. А.Л. Яншина или карты на базах типов формаций. Для базовой основы неотектонических карт, как правило, всегда использовались амплитуды вертикальных движений коры за мезо–кайнозойский или более короткие интервалы времени [23 и др.]. В конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века зародился новый подход к анализу неотектоники регионов с учетом не только вертикальных, но и горизонтальных движений земной коры и времени начала проявления неотектонических движений [2]. Тогда же начал формироваться и новый подход к оценке геодинамической активности литосферы с учетом стати-

стического взаимодействия между параметрами геодинамической активности [16].

Одно из приоритетных научных направлений текущего времени – современная геодинамика и составляемые соответствующие карты – требуют существенных изменений в принципах их построения. Карты должны основываться на таких определяющих параметрах, преимущественно количественных, изменения которых можно фиксировать за относительно короткие интервалы времени и, следовательно, прогнозировать на не весьма отдаленное будущее. Закладывая в основу легенд карт современной геодинамики количественные или, в крайнем случае, полуколичественные критерии оценки факторов, мы вынуждены уточнить и их временные границы – интервалы времени, охватываемые современными геодинамическими процессами. Таким образом, карты современной геодинамики наряду с научной ценностью приобретают благодаря возможностям пространственно-временного прогноза и социальную значимость.

### *Геолого-структурные факторы современной активизации, базовые приоритеты, методы их оценки*

Под современной тектонической активизацией следует понимать процессы, происходящие в настоящее, часто называемое реальным, время или происходившие в предшествовавшие столетия и о которых имеются достаточно достоверные геолого-геофизические или документальные исторические данные. Поскольку все наблюдаемые на поверхности геодинамические явления производятся в глубоких недрах планеты и, конечно же, реализуются последовательно в вышележащих оболочках, то естественно, говоря о современной геодинамике, необходимо определиться с какими объемами геологического пространства мы будем иметь дело. От этого зависят, в том числе, и энерге-

тические оценки тех или иных явлений. Поэтому к приоритетным факторам, определяющим современную геодинамику, мы относим толщину литосферы, ее напряженное состояние, современные движения слагающих ее блоков, трансрегиональные и региональные активные разломы, связанные с ними землетрясения и вулканическую деятельность. Именно эти процессы и структуры предопределяют современную, соизмеримую с жизнью нескольких поколений (100–150 лет), геодинамическую обстановку на земном шаре. Они и легли в основу составления карты современной геодинамики и ее легенды.

**Толщина литосферы.** Поскольку литосфера является полем для проявления тектонических процессов, а, в свою очередь, многие тектонические параметры зависят от толщины деформируемого слоя, то возникла необходимость вычисления толщины литосферы. Придерживаясь гипотезы, что литосфера является результатом остывания первичной Земли, то ее толщина в этом случае может рассматриваться как производная от геологического времени и вариаций плотности глубинного теплового потока. Наличие тенденций к связи геолого-геофизических характеристик с тектоническим возрастом литосферы – важный прогностический аспект количественного анализа неотектонических движений и сопутствующих им процессов [12]. Рассматривая различного рода зависимости тех или иных параметров от возраста земной коры, можно установить характер изменения величин относительно параметров условно невозмущенной тектоносферы (под невозмущенной тектоносферой мы понимаем некое статистически осредненное состояние всех ее параметров, принимаемых в дальнейшем в качестве фоновых), а их сравнение с реально наблюдаемыми полями, в свою очередь, позволяет выявить аномалии, вызванные наложением на такой условный “фон” возмущений, обусловленных общей активизацией тектоносферы. Учитывая последнее, целесообразно рассмотреть влияние на уже упоминавшиеся выше параметры той характеристики, которая в первом приближении могла бы отражать поведение глубинных процессов, ответственных за кайнозойскую активизацию тектоносферы или ее основных составных частей. Такой величиной является плотность теплового потока  $q$ , которая выступает в качестве относительной характеристики энергии глубинных процессов. В ходе тектонической активизации, определяемой по характеру формирования новейших структур на поверхности Земли, обнаруживается пространственная связь аномалий теплового потока, проявления наиболее интенсивных тектонических движений, магматизма (как интрузивного, так и эффузивного) и сейсмической активности, которые в ряде случаев носят и генетический характер. Поэтому представляется, что плотность теплового потока  $q$  может с успехом использоваться не только для ре-

шения прямых геофизических задач, связанных с изучением динамики глубинных процессов, но и при решении вопросов, связанных с выяснением природы тектонических движений.

Обратимся к сравнению величины  $L$ , характеризующей толщину литосферы, оцененную сейсмологическими методами и плотности теплового потока  $q$ . Первая теоретическая попытка аппроксимации толщины литосферы посредством величины  $q$  принадлежит Д. Чэпмэну и Г. Поллаку [49] – для глобальных реконструкций, вторая – В. Чермаку [37] – для реконструкций толщины литосферы под территорией бывшего СССР, третья – К.Г. Леви и С.В. Лысак [58] – для реконструкций толщины литосферы под континентами, но на существенно большем объеме материала и, наконец, четвертая – Л.Э. Левину [13] – для глобальных реконструкций толщины литосферы. В результате работ К.Г. Леви и С.В. Лысак [58] было установлено, что наилучшим образом эмпирическая зависимость  $L$  от  $q$  описывается уравнением (рис. 1):

$$L = 261.1e^{-0.015q}, \text{ км} \quad (1)$$

при  $r = -0.87$  и  $n = 125$ . Однако позже, к 1990 г., объем информации об  $L$  и  $q$  увеличился и возникла необходимость вычисления нового уравнения, уточняющего первое. Повторные оценки подтвердили наличие зависимости между этими параметрами. Уравнение связи между толщиной “сейсмической” литосферы и тепловым потоком имеет вид [59]:

$$L = 320.4 e^{-0.017q}, \text{ км.} \quad (2)$$

Отсюда, главный вывод заключается в том, что толщина литосферы наитеснейшим образом связана с плотностью теплового потока, несмотря на то, что земная кора реагирует на него очень слабо. Уравнение (2) и использовано при составлении одной из базовых составляющих описываемой карты.

**Активные разломы.** Термин введен в геологическую практику В.Г. Трифоновым [33]. Активные разломы, их выявление и картирование являются неотъемлемой частью современной геодинамики. Именно они играют роль ослабленных границ, по которым осуществляется перемещение тектонических блоков. По глубине проникновения разломы существенно отличаются друг от друга. Между длиной и глубиной проникновения активных разломов в диапазоне глубин 0–40 км устанавливается статистически значимая связь [30, 39]. Анализ соотношения характерных размеров тектонических блоков и глубиной их заложения [12] позволяет определить глубины проникновения разломов вплоть до подошвы литосферы. В табл. 1 приведены среднегеометрические размеры тектонических блоков сформированных как в пределах кратонических областей, так и в современных подвижных поясах.

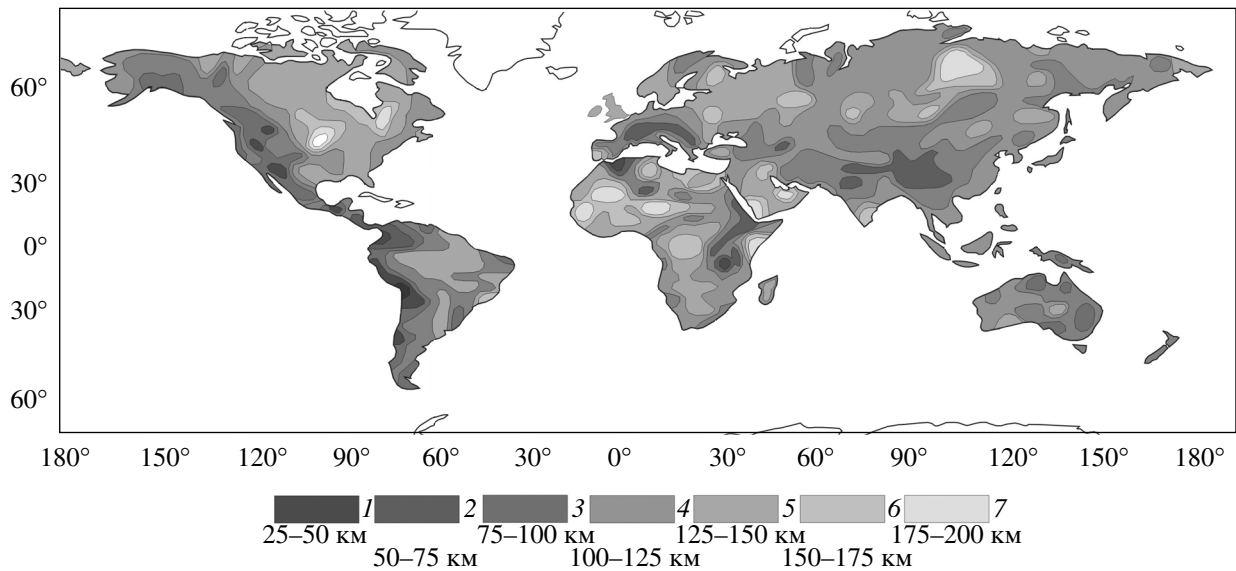


Рис. 1. Схема толщины континентальной литосферы

Блоки кратонических областей и подвижных поясов существенно отличаются по конфигурации. К сожалению, это важное обстоятельство не смогло быть отражено на карте современной геодинамики.

Для составления карты современной геодинамики Азии информация об активных разломах собиралась из многочисленных российских и зарубежных источников. Даже беглого взгляда на карту достаточно чтобы заметить, что активные разломы концентрируются в областях с тонкой и, следовательно, хорошо прогретой континентальной литосферой, тогда как в пределах кратонических областей активные разломы встречаются очень редко.

**Напряженное состояние литосферы.** Анализ современной геодинамики требует глубокого изучения и характеристики напряженного состоя-

ния литосферы. Проведенными в более ранние годы региональными работами по исследованию напряженного состояния земной коры геологоструктурными методами в пределах Байкальской рифтовой системы [40] были разработаны способы изображения напряженного состояния литосферы в виде площадей, цветовая гамма которых соответствует типам напряженного состояния, а их контуры – пространствам и объемам, находящимся в соответствующем напряженном состоянии. Интегрированный анализ всех фактических данных позволил выделить в упругой литосфере Земли шесть превалирующих типов напряженного состояния литосферы, четыре из которых главные: нейтральное ( $\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y$ ), растяжение ( $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ ), сжатие ( $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ ), сдвиг ( $\sigma_x > \sigma_z > \sigma_y$ ) и два промежуточных: растяжение со сдвигом ( $\sigma_z = \sigma_y \gg \sigma_x$ ) и сжатие со сдвигом ( $\sigma_x \gg \sigma_y = \sigma_z$ ). Для их определения

Таблица 1

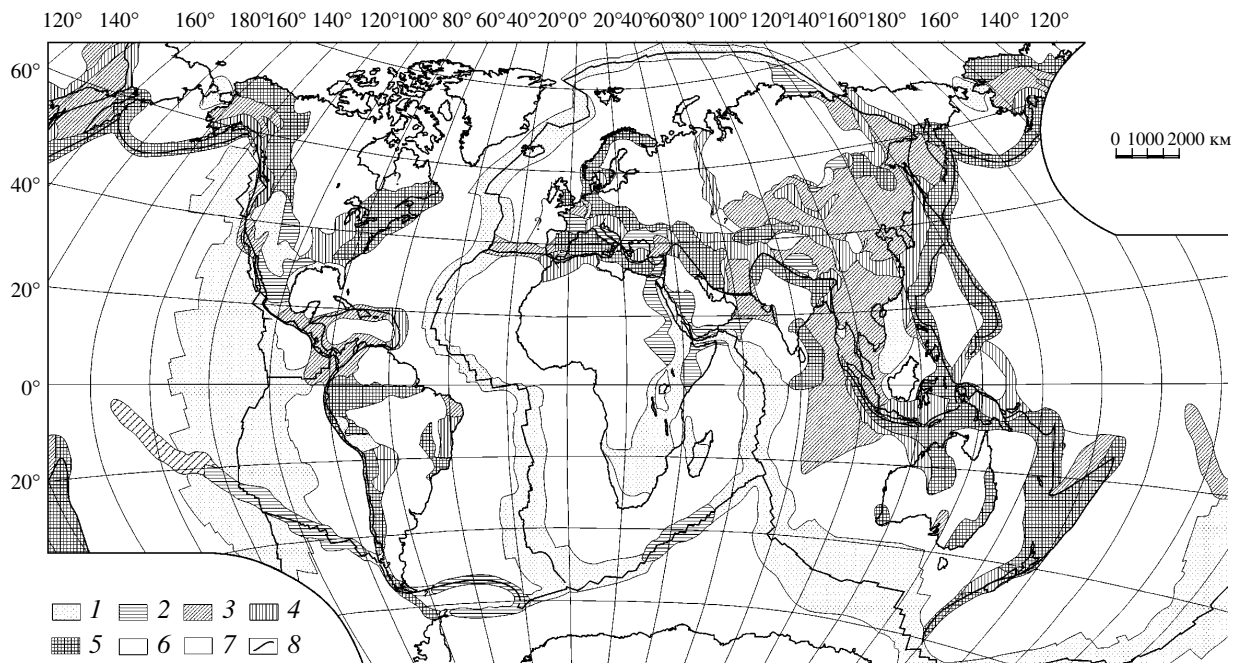
Геофизические слои	Кратонические области		Подвижные пояса	
	Среднегеометрические размеры блоков $L$ , км	Глубина заложения тектонических блоков $H$ , км	Среднегеометрические размеры блоков $L$ , км	Глубина заложения тектонических блоков $H$ , км
Метаморфогенно-осадочный	56.2 ± 28.1	3.9 ± 2.2	16.7 ± 10	7.7 ± 2.3
Метаморфогенно-осадочный и гранитный	49.7 ± 37.2	14.2 ± 4.1	25.2 ± 12.8	24.2 ± 6.5
Земная кора в целом	83.8 ± 33.7	42.2 ± 4.7	44.0 ± 13.5	43.7 ± 11.0
Земная кора и слои литосферной мантии	606.7 ± 235.0	112.2 ± 23.7	110.0 ± 31.9	92.6 ± 38.9
	1475.8 ± 350.4	162.4 ± 42.6	–	–
	2557 ± 328.6	178.8 ± 44.2	–	–

нет однообразных инструментальных или геолого-структурных данных по всему земному шару или его существенной части – континента Азии. Приходится использовать и интерпретировать разные источники инструментальных, сейсмологических, геолого-структурных или тектонических данных, последние из которых, к сожалению, позволяют только на полуколичественном уровне сделать заключение о типе напряженного состояния.

К настоящему времени собрано более 7000 данных об ориентировке напряжений в различных частях мира. По сути, все эти материалы вошли в карту М.Л. Зобак [71]. Нами они пополнены двумя видами дополнительных данных – тектоническими и сейсмологическими [42]. К тектоническим материалам, которыми, к сожалению, не пользовалась М.Л. Зобак, относится “Международная тектоническая карта мира” [53]. В дополнение к известным к 1992 году материалам и для уточнения информации по слабо охарактеризованным районам использована серия региональных карт и десятки публикаций [4, 5, 17, 29], в том числе новые материалы для Азии [10, 11]. Они суммируются за счет сейсмологических (около 50% из всей совокупности данных), инструментальных (деформографические, трещиноватость в скважинах по методу десквамации кернов и др., около 20% из всей совокупности данных) и геологических материалов (около 30% из всей совокупности использованных данных). Различные способы и приемы получения упомянутых сведений говорят о том, что интерпретируемая по ним информация не всегда однозначна. Данные отражают и разный возраст напряжений, и разную глубину их определения, и характеризуются разной точностью. Сейсмологические сведения характеризуют мгновенный (современный) возраст напряжений, но их корреляция с геолого-структурными данными по оценке напряжений свидетельствует о том, что возраст напряжений для больших по площади регионов как минимум четвертичный и даже более отдаленный по геохронологической шкале. Глубины оценки напряженного состояния охватывают объем коры до 20 км. Об этом свидетельствуют две группы фактов. (1) Для ряда районов мира, в том числе и для Байкальской рифтовой системы, установлено, что напряженное состояние земной коры, изученное по механизмам землетрясений с магнитудой  $\geq 4.5$ , идентично аналогичному напряженному состоянию, реконструированному по геолого-структурным данным, то есть по региональным и локальным разломам и трещиноватости [40]. (2) Ориентировки полей напряжений, установленные путем измерений *in-situ*, хорошо согласуются с геологическими наблюдениями на глубине до 1–2х километров, с напряжениями, изученными по керну скважин до глубин 4–5 км, и с напряжениями, установленными по механизмам очагов землетрясений до глубин,

как правило, 20 и более километров [71]. Принимая во внимание, что горизонтальные размеры геологических структур соизмеримы с вертикальными и даже превосходят их на 1–2 порядка, допустимо утверждать, что полученные индивидуальные определения векторов ориентировки главных напряжений правомерно распространять на площадные пространства в радиусе до 200 и более километров от непосредственной точки наблюдения. Для некоторых территорий с не изменяющимся геодинамическим режимом в течение мезо-кайнозоя были допущены и большие экстраполяции по однотипной ориентировке векторов напряженного состояния по площади. Естественно, говорить о высокой точности интегрированных значений векторов напряжений нельзя. Однако в представляемом мелкомасштабном варианте приводимые сведения о напряженном состоянии верхней части литосферы Земли без сомнения достоверны. Основным критерием проведения границ между областями с разными режимами стрессового состояния являлось преобладание в какой-нибудь области решений (по совокупности данных) определенного типа напряженного состояния, в соответствии со следующими соотношениями. Если определения ориентировки напряжений для тех или иных территорий были неоднозначны, на карту наносились преобладающие в количественном отношении данные. При этом принималось во внимание следующее обстоятельство. Тип поля напряжений считался по преобладающему более чем на 75% количеству однозначных данных. При соотношениях более неопределенных, например, 50/50, и даже, 40/60 и т. п. поле напряжений относилось к переходному. Оно могло быть полем напряжений сжатия в сочетании со сдвиговым или растяжения в сочетании со сдвиговым. Случаев, когда в равной степени встречались те и другие данные, не было. При недостатке инструментальных данных для уточнения границ между типами областей напряжений использованы Международная тектоническая карта мира [53] и материалы по современной морфологической характеристике разломов, позволяющие на качественном уровне оценить тип напряженного состояния литосферы. В результате стало возможным оценить напряженное состояние верхней части литосферы и в ряде асейсмичных районов Земли. Правомерность объединения сейсмологических и геолого-структурных данных при оценке напряженного состояния показана в [5, 40]. Сбор дополнительного фактического материала и дальнейшее совершенствование методики позволили составить более совершенную по сути и охвату территории “Карту напряженного состояния верхней части литосферы Земли” [42] (рис. 2).

**GPS-геодезия.** Спутниковая геодезия в настоящее время является мощным инструментом исследований современных движений на базах от первых



**Рис. 2.** Карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли. Составили С.И. Шерман, О.В. Лунина с использованием материалов M.L. Zoback “World stress map-maximum horizontal stress orientation” (1992), Международной тектонической карты мира (1981) и серии карт и публикаций по отдельным регионам

1. Типы напряженного состояния литосферы и соотношения вертикального  $\sigma_z$ , максимального  $\sigma_x$  и минимального  $\sigma_y$  горизонтальных напряжений сжатия: 1 – области растяжения  $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$ ; 2 – области растяжения со сдвигом  $\sigma_z = \sigma_y \gg \sigma_x$ ; 3 – области сдвига  $\sigma_x > \sigma_z > \sigma_y$ ; 4 – области сжатия со сдвигом  $\sigma_x \gg \sigma_y = \sigma_z$ ; 5 – области сжатия  $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ ; 6 – области тектонически нейтрального напряженного состояния  $\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y$ ; 7 – области с неустановленным типом напряженного состояния; 8 – границы основных литосферных плит

до тысяч километров. История ее применения в геодинамических исследованиях не насчитывает и 30-ти лет, и в то же время, создана сеть постоянных пунктов слежения, охватывающая территории всех континентов. Многочисленные локальные геодинамические полигоны располагаются в наиболее интересных тектонически активных регионах планеты. На территории Азии первые измерения с применением этих методов начаты в конце 80-х – начале 90-х годов [см. например 63 и др.]. В подавляющем большинстве случаев для геодинамических целей используется спутниковая система NAVSTAR (США) и, менее, ГЛОНАСС (Россия). В настоящее время на континенте и окружающих архипелагах располагается более 30 (из 150 по всему миру) постоянных станций IGS (Международной GPS службы для геодинамики) и тысячи других постоянных GPS-станций различного назначения. Существующие система наблюдений, количество спутников и программное обеспечение позволяют рассчитывать скорости смещений постоянных GPS-пунктов с точностью 1,2–5,0 мм/год по горизонтальным компонентам [57]. Вычисление кинематики глобального движения литосферных плит по данным GPS-геодезии показали, что полученные полюса вращения плит и скорости их движения согласуются с моделью

NUVEL-1A [51] в пределах среднего квадратичного отклонения величин. Они также согласуются с данными измерений методом длиннобазовой радиоинтерферометрии (VLBI) и метода лазерной локации искусственными спутниками земли (SLR) [57, 61, 62, 66]. За счет малогабаритности приемной аппаратуры, относительно невысокой ее стоимости, масштабы применения GPS-геодезии для геодинамических и геодезических измерений растут в геометрической прогрессии. Она стала главным инструментом для изучения современных движений земной поверхности.

Несмотря на достаточно редкую (в континентальном масштабе) сеть постоянных GPS-пунктов на территории Азии, в отличие от Европы или Северной Америки, имеющиеся данные измерений на постоянных GPS-станциях позволяют получить представление о современных движениях, как на границах континента, так и на границах блоков и микроплит, составляющих континент (рис. 3, 4). Представленные векторы скоростей горизонтальных движений Азии рассчитаны в Скрипсовском океанографическом институте (США) по данным измерений на постоянных GPS-пунктах [Scripps Orbit and Permanent Array Center, <http://lox.ucsd.edu>]. Векторы смещения пунктов рассчитаны относительно международной системы координат

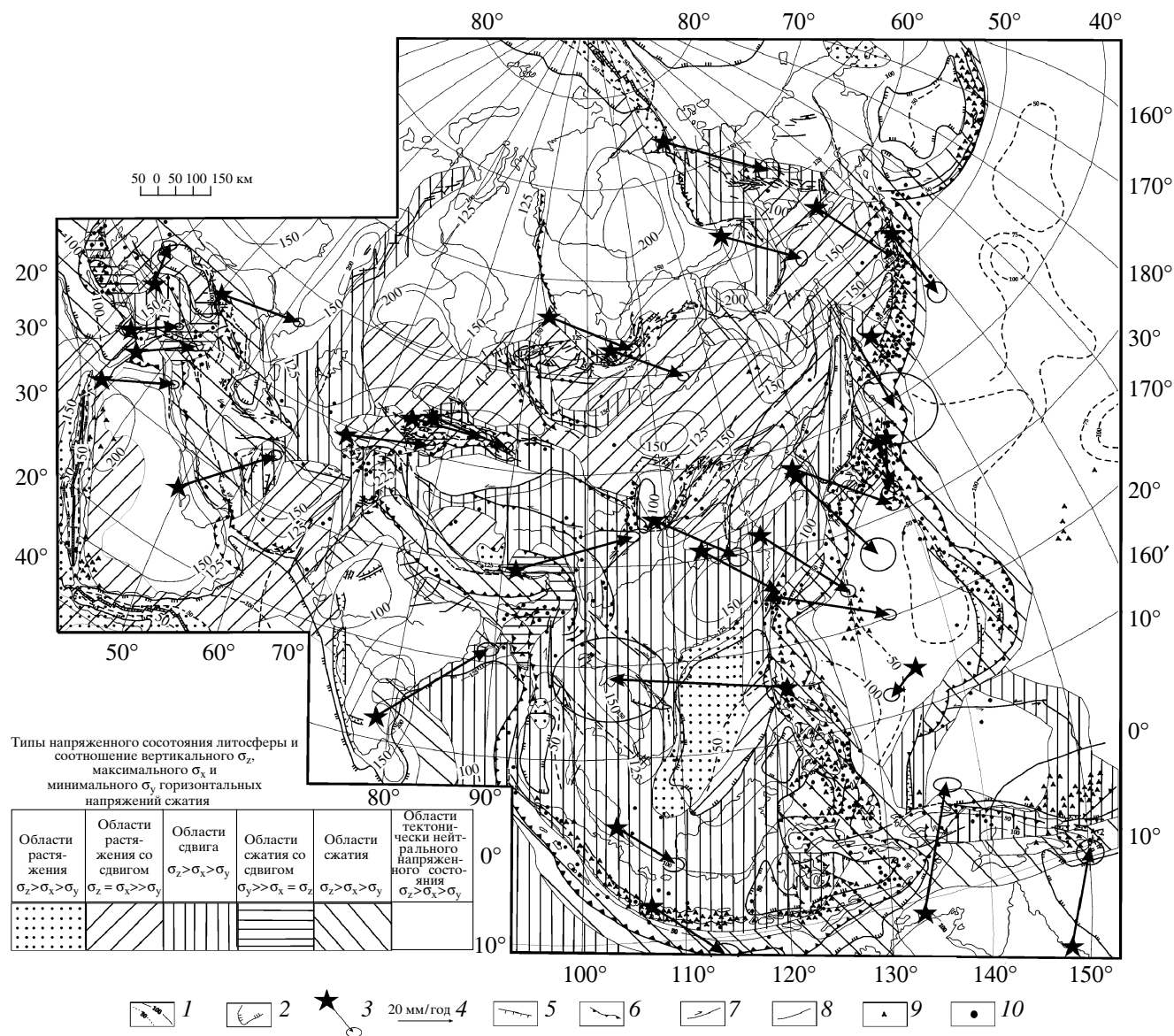


Рис. 3. Карта современной геодинамики Азии [9]

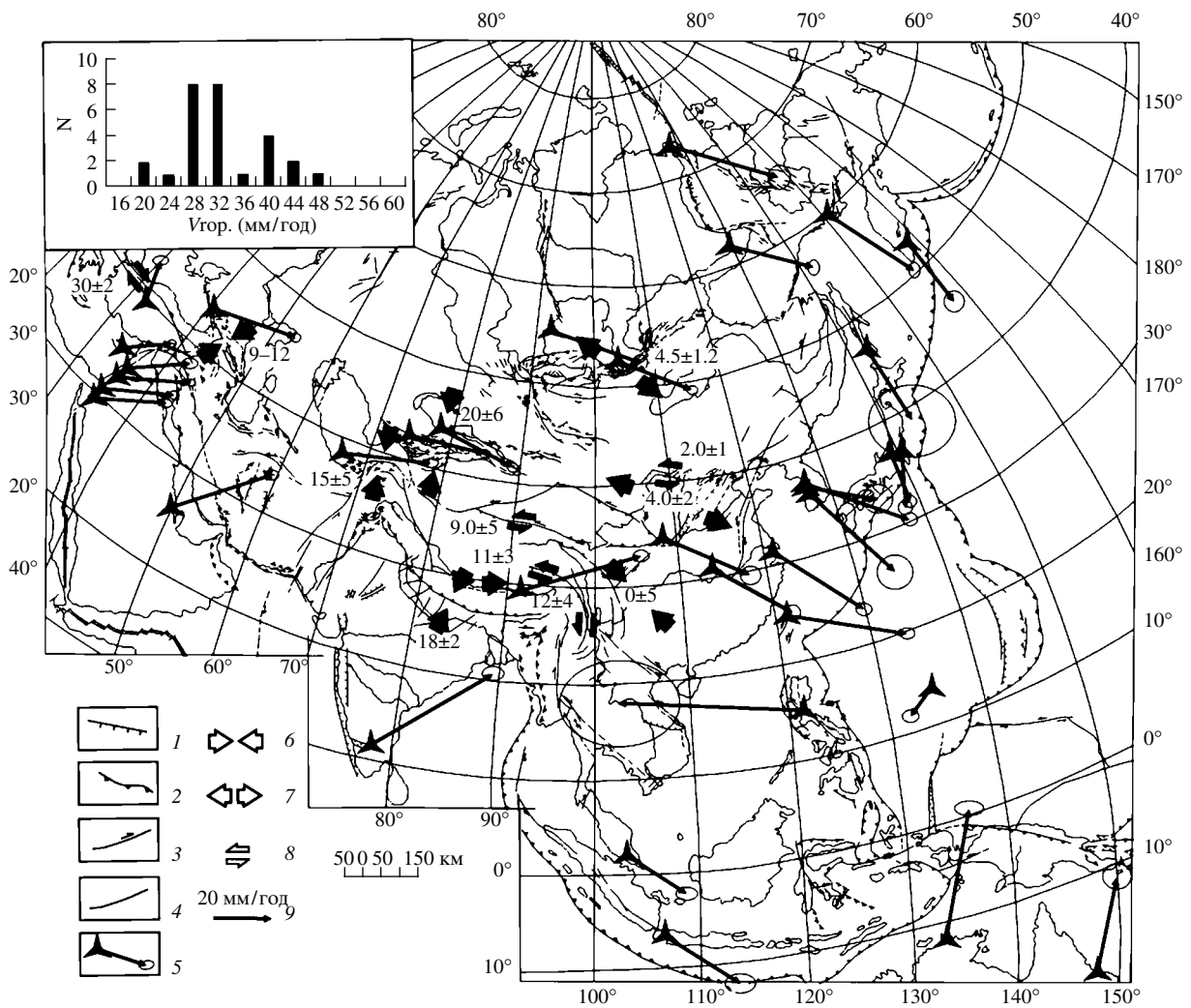
Структура литосферы: 1 – изолинии толщины литосферы, км; 2 – границы между океанской и континентальной литосферой. Движения, активные разломы, сейсмичность и вулканизм: 3 – векторы скоростей современных горизонтальных движений литосферных блоков с эллипсами ошибок (по данным GPS); 4 – масштаб векторов скоростей современных горизонтальных движений; 5 – сбросы; 6 – взбросы и надвиги; 7 – сдвиги; 8 – разломы с неустановленным типом смещений; 9 – действующие вулканы; 10 – эпицентры землетрясений  $M \geq 6$ .

(ITRF-97 International Terrestrial Reference Frame). Отражение горизонтальных движений блоков в планетарных масштабах связано с трудностью выбора системы отсчета. Выбор в качестве такового любого крупного континентального массива имеет недостатки, связанные с кинематической неоднородностью этого массива, т.е. с существованием относительных движений блоков внутри него. При этом, поле векторов смещений, геодинамически контрастно показывает взаимодействие выбранного блока с соседними, не дает представления о характере движений на границах других блоков.

Представление горизонтальных движений в геоцентрической системе координат представляется наиболее оптимальным.

#### Описание определяющих структурных элементов карты

Толщина литосферы. Вариации толщины континентальной литосферы иллюстрирует схема на рис. 1. На ней более светлыми тонами показаны относительно холодные области континентальной литосферы, где, собственно, она имеет максимальные



**Рис. 4.** Карта современных движений Азии по данным GPS-геодезии

1–4 – активные разломы: 1 – сбросы, 2 – взбросы и надвиги, 3 – сдвиги, 4 – разломы неопределенного кинематического типа; 5 – векторы горизонтальных движений постоянных GPS-пунктов относительно в системе координат ITRF-97 (использованы расчеты Scripps Orbit and Permanent Array Center (<http://www.sopac.ucsd.edu>) с эллипсами 95% доверительного интервала); 6–8 – преимущественный тип деформаций на геодинамических полигонах: 6 – сжатие, 7 – растяжение, 8 – сдвиг (цифрами показаны скорости горизонтальных движений в мм/год); 9 – масштаб векторов скоростей современных горизонтальных движений в мм/год.

значения толщины. Более темные поля – наиболее разогретые и более тонкие области континентальной литосферы. Важной является закономерность, которая прослеживается повсеместно – литосфера существенно тоньше и горячее под современными мобильными поясами. Здесь ее толщина составляет всего 40–100 км, тогда как под древними кратонами она может достигать 250–280 км. Именно эти резкие вариации толщины литосферы предопределяют степень ее подвижности, локализацию деформационных процессов, сопровождающихся разломообразованием, сейсмичностью и вулканизмом.

Весьма важным фактором при этом является соотношение между горизонтальной и верти-

кальной компонентами неотектонических и сейсмотектонических движений. Геологи привыкли воспринимать условия сжатия по преобладанию взбросов и надвигов, растяжения – по превалированию сбросов, а горизонтального скольжения – по доминированию сдвигов. Однако такое заключение носит умозрительный характер, поскольку, как правило, подтверждающие статистические данные не приводятся. В действительности, для литосферы энергетически выгодными являются горизонтальные (сдвиговые) движения и подвижки, поскольку они не требуют затрат на преодоление гравитации в отличие вертикальных. Доказательства приведены в табл. 2.

Таблица 2

Геодинамические условия	Типы подвижек в % от объема выборки			Общее количество событий
	взбросы и надвиги	сдвиги	сбросы	
Кратоны и современные платформы	38	46	16	13
Конвергентные пояса	33	41	26	58
Сдвиги и трансформные разломы	–	80	20	15
Раздвиги	14	35	51	29
Все сейсмоактивные районы	25	45	30	105
<b>Средние статистические условия</b>	<b>22</b>	<b>49</b>	<b>29</b>	<b>220</b>

Таким образом, в процентном отношении сдвиги являются господствующим типом перемещений в литосфере, что не противоречит физике явлений [12]. Исходя из этого, проанализируем напряженно-деформированное состояние литосферы на фоне выявленных закономерностей.

**Поля напряжений.** Дадим краткое описание карты полей напряжений мира для более полного представления о напряженном состоянии хрупкой части литосферы азиатского континента (см. рис. 2). В большинстве районов поле напряжений однородно по всей толщине, о чем свидетельствуют согласованность сочетаний ориентировок векторов, полученных разными методами. Региональная согласованность ориентировок напряжений позволила выделить, в некоторых случаях объединить однотипные региональные поля. Таким способом были выделены крупные области с разными типами напряженного состояния верхней части литосферы.

Общее рассмотрение карты напряженного состояния верхней части литосферы Земли показывает, что в расположении главных типов полей напряжений на поверхности Земли отмечаются определенные закономерности [42]. Одни из них связаны с распределением областей напряжений по отношению к оси вращения планеты и могут характеризоваться с использованием сетки географических координат; другие – со структурой верхней части литосферы и ее делением на континентальную и океаническую. Краткий анализ напряженного состояния верхней части литосферы Земли дает основания для следующих заключений.

1. Области растяжения и сжатия имеют вытянутую линейную форму и ориентированы преимущественно в меридиональном и широтном направлениях.
2. Широтные области растяжения тяготеют к высоким северным и южным широтам; меридиональные – примерно к 30°, 120° з. д. и 65° в. д., образуя между собой двугранные углы примерно в 90°.
3. Широтная область сжатия тяготеет к 35° с.ш.; меридиональные – к 145° в. д. и 75° з. д., образуя между собой двугранный угол примерно в 140°.
4. Широтному растяжению, с которым совпадает

структура Срединно-Атлантического хребта, связанная со срединговым процессом, соответствует на противоположной стороне планеты широтное сжатие, с которым совпадает Западно-Тихоокеанское побережье, вовлеченное в процесс субдукции.

5. Широтным растяжениям по высоким широтам “противопоставляется” широтное сжатие по 35° с. ш.
6. Области сдвиговых напряжений охватывают преимущественно Центральную Азию и пограничные переходные территории между областями сжатия и растяжения.
7. Области с нейтральным напряженным состоянием, когда сила тяжести  $\sigma_z$  больше двух других равных между собой горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , занимают большую часть поверхности Земли и характеризуются изометричной формой [42].

Способ районирования земной поверхности в виде областей, характеризующихся определенными типами напряженного состояния, позволил О.В. Луниной [18] провести их количественную оценку по занимаемой площади на земной поверхности и в объеме земной коры. Расчет площадей осуществлялся квадратной палеткой со стороной 250 км. Поскольку карта составлена на основе псевдоцилиндрической картографической проекции, где искажение площадей увеличивается по мере удаления от среднего меридиана, изображенного прямой линией, при расчете вводился поправочный коэффициент, вычисленный эмпирическим путем и изменяющийся от 1 до 0.73 [18]. Результаты по распределению различных типов напряженного состояния на поверхности Земли представлены в табл. 3.

В пределах Азии тектонический режим растяжения и растяжения со сдвигом распространен на незначительных площадях. Большое значение имеет объем литосферы, характеризующийся определенным типом напряженного состояния. Поэтому, приняв, что поле напряжений существенно не изменяется с глубиной в границах хрупкой (упругой) части литосферы и средней мощностью континентальной коры равную 35 км, а океанической – 7.5 км, О.В. Луниной были определены соотношения объемов масс литосферы Азии с различными напряженными состояниями (табл. 4). Результаты расчетов по-



**Таблица 3.** Распределение площадей и объемов масс земной коры по типам напряженного состояния, [18]

Тип напряженного состояния	Континентальная кора			Океаническая кора			Земная кора в целом			
	площадь		объем	площадь		объем	площадь		объем	
	тыс. км <sup>2</sup>	%	тыс. км <sup>3</sup>	тыс. км <sup>2</sup>	%	тыс. км <sup>3</sup>	тыс. км <sup>2</sup>	%	тыс. км <sup>3</sup>	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сжатие	20707	14	724745	15856	4	118920	36563	7	843665	10.6
Сдвиг	16878	11	590730	12688	4	95160	29566	6	685890	8.7
Растяжение	9128	6	319480	64213	18	481598	73341	14	801078	10.1
Сжатие со сдвигом	10720	7	375200	4589	1	34417	15309	3	409617	5.2
Растяжение со сдвигом	5891	4	206185	6823	2	51172	12714	3	257357	3.3
Нейтральный	80978	55	2834230	239649	66	1797368	320627	63	4631598	58.4
Неустановленный	2623	2	91805	2842	1	21315	5465	1	113120	1.4
Неустановленный за пределами границ карты	2175	1	76125	14440	4	108300	16615	3	184425	2.3
Все типы	149100	100	5218500	361100	100	2708250	510200	100	7926750	100

казывают, что объемы земной коры тектонически активных регионов Азии охвачены преимущественно напряжениями сдвига, сжатия и сжатия со сдвигом.

Дополнительно была проведена приблизительная оценка объемов масс верхней части литосферы Земли, характеризующихся различными типами напряженных состояний. Предыдущими исследователями установлено, что поле напряжений в первом приближении постоянно для земной коры и ориентировка напряжений в горизонтальной плоскости в пределах точности измерений существенно не меняется с глубиной [14, 71]. Приняв это положение и среднюю мощность континентальной коры равную 35 км, а океанической – 7.5 км [3], определены объемы масс с различными напряженными состояниями (см. колонки 10, 11 в табл. 3). Оказалось, что в целом для 10.6% верхней части литосферы характерно сжатие, для 8.7% – сдвиговое поле напряжений, для 10.1% – растяжение, для 5.2% – сжатие в сочетании со сдвигом, для 3.3% – растяжение в сочетании со сдвигом и для 58.4% – нейтральное поле напряжений. Незначительная часть объема земной коры приходится на неустановленный тип поля напряжений – 3.7%. Отсюда, три главных типа напряженного состояния – сжатие, растяжение и сдвиг, определяющие геолого-геофизические процессы, протекающие в земной коре, примерно в равной степени распространены в ней. Это свидетельствует о том, что верхняя часть литосферы Земли в целом находятся в динамически сбалансированном состоянии. Результаты расчетов показывают, что объемы земной коры тектонически активных регионов

Азии охвачены преимущественно напряжениями сдвига, сжатия и сжатия со сдвигом [41].

Таким образом, верхняя упругая часть литосферы Земли характеризуется сложным напряженным состоянием, общие закономерности которого позволила выявить карта (см. рис. 2). Можно утверждать, что напряженное состояние – важная, сложная, изменяющаяся в пространстве и времени фундаментальная характеристика литосферы, которая наряду с другими ее параметрами (тепловым потоком, гравитационным и магнитным полями, слоистостью и разломно-блоковой структурой) определяет современную геодинамику региона и контролирует протекающие в ней процессы.

**Таблица 4.** Процентное соотношение площадей и объемов верхней части литосферы Азии с разными типами напряженного состояния

Тип напряженного состояния	Охваченные площади, % от всей площади	Охваченные объемы, % от полного объема
Сжатие	30	24
Сдвиг	37	42
Растяжение	6	4
Сжатие со сдвигом	21	23
Растяжение со сдвигом	6	7
Все типы	100%	100%

**GPS-геодезия.** Анализ поля смещений постоянных GPS пунктов показывает, что в целом, относительно геоцентрической системы координат ITRF97, континентальная часть Азии смещается в ВЮВ направлении (см. рис. 4). При этом есть признаки вращения по часовой стрелке. На востоке Азиатского континента все суммарное юго-восточное движение реализуется в зоне конвергенции Евразийской и Тихоокеанской плит. Гистограмма распределения скоростей горизонтальных движений постоянных GPS пунктов (см. врезку на рис. 4), векторы которых показаны на карте, показывает, что средняя скорость этого движения (близкая к медианному ее значению) составляет 30 мм/год. Вариации значений этого параметра связаны с тем, что Азиатский континент состоит из сложного набора литосферных блоков и микроплит, движение которых иногда не совпадает по направлению и скорости с движением основной части континента. Северная часть Евразии представляется наиболее стабильной и монолитной структурой континента, что позволило авторам работы [1] выделить ее в отдельную Северо-Евразийскую литосферную плиту. По оценкам, в зависимости от длительности использованного периода измерений и выбранного набора станций для характеристики Евразии отклонения отдельных точек внутри Северной Евразии варьируют от  $4.6 \pm 5.6$  [56] до  $0 \pm 1$  мм/год [55]. Блоки южной части континента характеризуются высокими скоростями горизонтальных движений и, что важно подчеркнуть, несогласованностью движения по направлению с Северной Евразией. Максимальные значения скорости характерны для Индостанского литосферного блока (48 мм/год). Несогласование направлений движения блоков указывают в данном случае на конвергентную составляющую их относительного движения. Геологически это выражается в развитии структур сжатия Альпийско-Гималайского пояса.

Многообразие режимов тектонического деформирования литосферы на территории Азиатского континента заставляет рассматривать результаты исследований на локальных геодинамических полигонах раздельно для внутриконтинентальных зон сжатия, сдвига и растяжения.

**Зоны сжатия.** Современные деформации земной коры в режиме сжатия в пределах Азиатского континента исследованы в трех регионах – Гималаи, Тянь-Шань и Кавказ. Результаты измерений методом GPS-геодезии на Гималайском (назовем его условно так) полигоне опубликованы К.М. Ларсон с соавторами [56]. Шестилетние наблюдения на 30 станциях позволили определить, что в зоне коллизии вкост простирания Непальских Гималаев происходит сокращение приповерхностной части коры со скоростью  $18 \pm 2$  мм/год по направлению  $12^\circ \pm 13^\circ$  с.ш. ( $1\sigma$ ) (см. рис. 4). Таким образом, судя по разнице скоростей движения пунктов на территории Индостана (Бангалор) и

во внутренней части Тибета (Лхаса), во фронтальной части зоны коллизии на сокращение коры и поднятие уходит порядка 45% всей деформации. Остальная часть передается севернее в районы Тибета и Монголии. Авторами показано также, что на фоне общего сжатия между северо-западным Непалом и Лхасой происходит широтное растяжение со скоростью  $11 \pm 3$  мм/год, что находится в хорошем согласии с геологическими и сейсмологическими данными.

Киргизский полигон располагается в несколько иной ситуации по отношению к источнику тектонических усилий, нежели Гималайский. Структуры Тянь-Шаня, Джунгарии, Алтая и Саян относятся к зоне торошения литосферы [2, 32], генетически связанной с зоной Индо-Евразийской коллизии. Исследования международной группы ученых [43] показали, что современные деформации Тянь-Шаня определяются направленным на север движением Таримского блока со скоростью не менее  $13 \pm 2$  мм/год. Понятно, что все GPS-пункты в пределах полигона южнее окраины Казахской платформы, располагаются в пределах зоны активных деформаций. Поэтому, предполагается, что истинная скорость смещения Таримского блока относительно Казахской платформы составляет 20 мм/год (см. рис. 4). Как показывают измерения по профилям вкост простирания Тянь-Шаня, скорости горизонтальных смещений по отдельным разломам не превышают нескольких мм/год, что соответствует известным геодезическим оценкам. Анализируя известные данные о горизонтальном сокращении коры в районе Тянь-Шаня, авторы публикации пришли к выводу, что поднятие этого горного сооружения могло произойти за ближайшие 10 млн. лет. При этом предполагается увеличение скорости деформации со временем [43].

Как показано в [47], вдоль меридиональной полосы между  $87-90^\circ$  в.д. полная скорость сжатия между Индией и отрогами Северного Тянь-Шаня (Урумчи) составляет  $33.5 \pm 5$  мм/год. Большая часть этой деформации ( $20.3 \pm 3$  мм/год) реализуется в Гималаях,  $9 \pm 2$  мм/год – вкост простирания Тибета,  $2.5 \pm 1.5$  мм/год – вкост Алтын-Тагского разлома и  $2 \pm 3$  мм/год – вкост Южного Тянь-Шаня. Высокие скорости сжатия в Южном Тянь-Шане, полученные авторами работы [43], по отношению с данными о малых скоростях меридионального сжатия в восточной части Южного Тянь-Шаня, вероятно, связаны с вращением Таримской плиты относительно Евразии по часовой стрелке со скоростью  $1^\circ$  за миллион лет [47].

Для изучения современной геодинамики Кавказа GPS-геодезия начала применяться с 1991 года [27, 38, 63]. Геодезическая сеть на эпоху 1997 года насчитывала 25 пунктов [38]. Специальным объектом для исследований на Кавказском полигоне является эпицентральной зона Рачинского землетрясения

1991 года ( $M_s = 6.9 - 7.1$ ), где плотность сети значительно увеличена. Поле скоростей горизонтальных движений, построенных для региона относительно стабильной Евразии, однозначно показывает, что деформации коры определяются здесь, главным образом, смещением в северных румбах Аравийской плиты со скоростями 10–17 мм/год. Одновременно происходит латеральное выжимание Анатолийской микроплиты в западном направлении со скоростями 19–23 мм/год. Южная часть Кавказской горной системы (Малый Кавказ) характеризуется движением коровых масс в север-северо-восточном направлении со скоростями 9–12 мм/год. Интересно, что векторы движений всех пунктов полигона, расположенных севернее линии главного Кавказского надвига не совпадают по направлению с векторами пунктов, расположенные южнее этой линии. Скорости смещений в первой зоне, как правило, существенно меньше, чем во второй. Картина смещений позволяет предполагать разнонаправленное латеральное выжимание вещества на фоне поднятия.

**Зоны сдвига.** Наиболее хорошо изученной методами спутниковой геодезии структурой сдвигового типа является Северо-Анатолийский разлом. Сеть GPS-пунктов заложена здесь в 1988 году, наблюдения ведутся не только с использованием GPS-технологии, но на отдельных пунктах проводятся измерения методом SLR [63]. При выборе за систему отсчета Евразии, как стабильного блока, из результатов измерений авторов статьи можно заключить, что северная часть Аравийской плиты движется в северо-восточном направлении  $38 \pm 13^\circ$  со скоростью  $20 \pm 2$  мм/год. В целом это соответствует расчетам движений этой плиты по модели NUVEL 1A ( $23 \pm 7^\circ$  и  $24 \pm 2$  мм/год соответственно). Движение Аравийской плиты вызывает деформации севернее сутуры, на территории Турции. При этом восточная часть Турции характеризуется рассеянной деформацией сжатия, в то время как центральная и западная ее части характеризуются когерентным смещением в западном направлении с вращением Анатолийской плиты против часовой стрелки. Северо-Анатолийский разлом показывает правосторонние сдвиговые смещения со скоростью  $30 \pm 2$  мм/год, что коррелирует с геологическими данными. Внутренние деформации в центральной части Анатолийской плиты не превышают 2 мм/год. Скорость левостороннего сдвига вдоль Восточно-Анатолийского разлома оценена в  $15 \pm 3$  мм/год. Р.И. Рейлинджер с соавторами [63] пришли к выводу о том, что сдвиговая тектоника по границам Анатолийской плиты обусловлена ее вращением против часовой стрелки за счет давления со стороны Аравийской плиты, с одной стороны, а также за счет базального волочения литосферы, вызванного поддвигом Африканской плиты вдоль Эллинской зоны субдукции.

Интересные данные о скорости современных сдвиговых движений получены Р. Бендик с соавторами [47]. Ими исследованы современные деформации в зоне Алтын-Тагского разлома, ограничивающего плато Тибет с севера. Для получения данных о вертикальных смещениях использованы результаты нивелирования за период с 1957 по 1979 гг., данные о горизонтальных движениях получены по результатам измерений методом GPS-геодезии за период с 1994 по 1998 гг. Скорость современных левосторонних смещений вдоль разлома составила  $9 \pm 5$  мм/год при сжатии вкрест простирания разлома со скоростью  $3 \pm 1$  мм/год. В более широком масштабе эти данные показывают, что Тибетский блок сжимается в направлении С–Ю со скоростью  $9 \pm 1$  мм/год. Скорость смещений вдоль разлома, полученная по геодезическим данным, в 2–4 раза ниже, чем значение, полученное по геологическим данным [59], что требует своего объяснения как с точки зрения точности измерений, так, возможно, и с точки зрения временной эволюции тектонических деформаций.

Исследование с использованием GPS-технологии системы разломов Ксианьшуйхэ–Ксиаоджианг в Юго-Восточном Китае, проведенное Р.В. Кингом с соавторами [54], позволило подтвердить высокую активность структуры на современном этапе. Пункты, находящиеся юго-западнее этой зоны испытывают смещение на юг со скоростями 5–15 мм/год относительно западной части Сичуаньской впадины (город Ченьду) в то время, как пункты, расположенные северо-западнее впадины смещаются со скоростями всего лишь 0–5 мм/год. Такая ситуация отражает вращение против часовой стрелки блока, включающего запад Сичуаньской впадины и западный Юннань вокруг восточного Тибетского синтаксиса с одновременным левосторонним смещением вдоль системы разломов Ксианьшуйхэ–Ксиаоджианг и разлома Красной реки со скоростью  $12 \pm 4$  мм/год [54].

**Зоны растяжения.** Наиболее изученными в геолого-геофизическом плане на территории Азии зонами растяжения являются рифтовые системы Шанси и Прибайкалья.

Исследования современных движений в рифтовой зоне Шанси методами GPS-геодезии организованы в начале 90-х годов [65]. Обработка данных измерений на 68 пунктах позволила установить, что в отличие от распространенного мнения о правостороннем смещении вдоль грабена Шанси, современное развитие этой структуры происходит под воздействием растяжения в восток-юго-восточном направлении со скоростью  $4 \pm 2$  мм/год. При этом в северной части Китая, примерно вдоль  $40^\circ$  с.ш., располагается зона левостороннего сдвига по разлому, характеризующегося скоростью современных горизонтальных смещений в  $2 \pm 1$  мм/год [65]. Этот разлом отделяет зону активного растяжения на юге

от относительно стабильной территории Монголии.

Байкальский геодинамический GPS полигон организован в 1994 году [31, 48]. Он охватывает южную часть Байкальской впадины и структуры юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы. На первом этапе измерений скорость растяжения оценена в  $4.2 \pm 1.2$  мм/год [48] в направлении  $110 \pm 30^\circ$  в.д. Эта скорость отражает дивергентные движения Амурской литосферной плиты и стабильной плиты Северной Евразии. Оценки скорости растяжения на северо-восточном фланге Байкальской рифтовой системы по данным о голоценовых косейсмических смещениях по разломам [64] не противоречат полученным геодезическим данным – они составили  $3.2 \pm 0.5$  мм/год в направлении  $140 \pm 20^\circ$ . Таким образом, в районе Байкальского рифта наблюдается соответствие результатов оценок скоростей растяжения по геолого-геоморфологическим данным, характеризующим долговременную составляющую активных движений, и по геодезическим данным, дающим представление об их кратковременной составляющей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя выше сказанное, отметим, что при оценке особенностей современной геодинамики территории Евразии, да и других континентов, необходимо учитывать:

– объем литосферных масс, деформируемых в процессе тектогенеза;

– характер пространственного распределения активных разломов и векторов перемещений по ним, будь то вертикальных или горизонтальных;

– напряженно-деформированное состояние верхней хрупкой части литосферы, определяющее пространственную локализацию сейсмических и вулканических процессов.

Реализованная на представленной “Карте современной геодинамики Азии” модель является фундаментальной базой для пространственно-временного анализа проявления современных геолого-геофизических процессов эндогенного происхождения.

Авторы благодарят академиков Ю.Г. Леонова, В.Е. Хаина и члена-корреспондента РАН В.В. Ярмолюка за рекомендации, учтенные при редактировании рукописи.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-05-00251; 05-05-64702, 05-05-97285-р), программы 16 Президиума РАН, проект 3 “Динамика деформационных процессов в сейсмоактивных регионах Центральной Азии и в очаговых зонах крупных землетрясений”; интеграционных проектов СО РАН №№ 87 и 7.10.3.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В.* Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // *Геотектоника*. 2004. № 1. С. 3–20.
2. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника / Ред. Н.А.Логачев. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. 207 с.
3. Горная энциклопедия. Т. 1. М.: Недра, 1978. 486 с.
4. *Гущенко О.И.* Анализ ориентировок сколовых перемещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // *ДАН СССР*. 1973. Т. 210. № 2. С. 331–334.
5. *Гущенко О.И.* Кинематический принцип относительной хронологии палеонапряжений: основной алгоритм тектонического стресс-мониторинга литосферы // *Теоретические и региональные проблемы геодинамики*. М.: Наука, 1999. С. 108–125.
6. *Гущенко О.И., Сим Л.А.* Поле современных мега-региональных напряжений сейсмоактивных областей юга Евразии // *Изв. Вузов. Геология и разведка*. 1997. № 12. С. 17–22.
7. *Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А.* Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979. 311 с.
8. Карта активных разломов СССР и сопредельных территорий. М-б 1:8000000. Объяснит. Записка. Отв. ред. В.Г.Трифонов. М.: ГИН, 1987. 48 с.
9. Карта современной геодинамики Азии. Составители: К.Г. Леви, С.И. Шерман, В.А. Саньков, О.В. Лунина, А.В. Лухнев. Институт земной коры СО РАН. Иркутск: Изд. ГП 475 ВКФ, 2007.
10. *Копп М.Л.* Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе. М.: Научный мир, 1997. 314 с.
11. *Копп М.Л.* Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2005. 340 с.
12. *Леви К.Г.* Неотектонические движения в сейсмоактивных зонах литосферы. Тектонофизический анализ. Новосибирск: Наука, 1991. 165 с.
13. *Левин Л.Э.* Строение термической литосферы и астеносферы в океанах и на континентах // *Геотектоника*. 2006. № 5. С. 39–49.
14. *Леонов Ю.Г.* Напряжения в литосфере и внутриплитная тектоника // *Геотектоника*. 1995. № 6. С. 3–21.
15. *Леонов Ю.Г., Гущенко О.И., Копп М.Л., Расцветаев Л.М.* Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе Альпийского пояса и его северном платформенном обрамлении // *Геотектоника*. 2001. № 1. С. 36–59.
16. *Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г.* О принципах и методике составления карты новейшей тектоники Сибири // *Методические рекомендации к Атласу тектонических карт и опорных профилей Сибири*. Новосибирск: ИГиГ, 1981. С. 12–20.
17. *Лукк А.А., Юнга С.Л.* Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. Душанбе: Дониш, 1988. 230 с.
18. *Лунина О.В.* Анализ распределения типов напряженного состояния в земной коре // *Геофизика–2001: Тез. докл. Межд. конф. молодых ученых, специалистов и студентов*. Новосибирск. 4–9 сен-

- тября 2001 г. Новосибирск: ЕАГО; НГУ; ИГФ СО РАН, 2001. С. 126–128.
19. Макаров В.И. Активные глубинные деформации и сейсмичность литосферы новейших подвижных поясов // Основные проблемы сейсмотектоники. М.: Наука, 1986. С. 36–39.
  20. Макаров В.И. Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. М.: Наука, 1977. 171 с.
  21. Макаров В.И., Абдрахматов К.Е., Айтматов И.Т. и др. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). М.: Научный мир, 2005. 400 с.
  22. Макаров В.И., Трифонов В.Г. Монголия – внутриконтинентальная область преобладания новейших сдвиговых перемещений // Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М.: Наука, 1988. С. 235–275.
  23. Николаев Н.И. Карта новейшей тектоники Мира // Геоморфология. 1970. № 4. С. 3–20.
  24. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988. 491 с.
  25. Никонов А.А. Активные разломы: определение и проблемы выделения // Геоэкология. 1995. № 4. С. 16–27.
  26. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / Отв. ред. А.Ф. Грачев. М.: ОИФЗ, 2000. 487 с.
  27. Прилепин М.Т., Баласанян С., Баранова С.М., Гусева Т.В., Мишин А.В., Надария М., Рогожин Е.А., Розенберг Н.К., Сквородкин Ю.П., Хамбургер М., Кинг Р., Рейлингер Р. Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GPS технологии // Физика Земли. 1997. № 6. С. 68–75.
  28. Ребецкий Ю.Л. Реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций ЮВ Азии и Океании // Докл. РАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 101–104.
  29. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2007. 406 с.
  30. Саньков В.А. Глубины проникновения разломов. Новосибирск: Наука, 1989. 136 с.
  31. Саньков В.А., Леви К.Г., Кале Э., Девершер Ж., Лесне О., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Буддо В.Ю., Залуцкий В.Т., Башкуев Ю.Б. Современные и голоценовые горизонтальные движения на Байкальском геодинамическом полигоне // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 422–430.
  32. Трифонов В.Г. Неотектоника Евразии. М.: Научный мир, 1999. 254 с.
  33. Трифонов В.Г. Особенности развития активных разломов // Геотектоника. 1985. № 2. С. 16–26.
  34. Трифонов В.Г., Востриков Г.А., Кожурин А.И., Лукина Н.В., Макаров В.И., Скобелев С.Ф. Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М.: Наука, 1988. 365 с.
  35. Трифонов В.Г., Караханян А.С. Геодинамика и история цивилизаций. М.: Наука, 2004. 668 с.
  36. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во МГУ, 1995. 480 с.
  37. Чермак В. Геотермальная модель литосферы и толщина литосферы территории СССР // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 1. С. 25–38.
  38. Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Мишин А.В., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Э., Хамбургер М.У., Шемпелев А.Г., Юнга С.Л. Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS измерений и сейсмологическим данным) // Физика Земли. 1999. № 9. С. 3–18.
  39. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, СО РАН, 1977. 103 с.
  40. Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, СО РАН, 1989. 158 с.
  41. Шерман С.И., Лунина О.В. Напряженное состояние литосферы Азии // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Институт земной коры. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2003. С. 271–275.
  42. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Докл. РАН. 2001. Т. 378. № 5. С. 672–674.
  43. Abdrakhmatov K.Ye., Aldazhanov S.A., Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T.A., Kalabaev K.B., Makarov V.I., Molnar P., Panasyuk S.V., Prilepin M.T., Reilinger R.E., Sadybakasov I.S., Souter B.J., Trapeznikov Yu.A., Tsurkov V.Ye., Zubovich A.V. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates // Letter to Nature. 1996. Vol. 384. P. 450–453.
  44. Active faults in and around Japan: the distribution and the degree of activity // J. Natur. Disas. Sci. 1980. Vol. 2. № 2. P. 61–99.
  45. Angellier J., Tarantola A., Valette B., Manoussis S. Inversion field data in fault tectonics to obtain the regional stress. I. Single phase fault populations: a new method of computing the stress tensor // Geoph. J. Astr. Soc. 1982. Vol. 69. P. 607–621.
  46. Atlas of active faults in China. Seismological press, Xi'An Cartographic Publ. House. 1989. 118 p.
  47. Bendick R., Bilham R., Freymueller J., Larson K., Yin G. Geodetic evidence for a low slip rate in the Altyn Tagh fault system // Nature. 2000. Vol. 404. № 2. P. 69–72.
  48. Calais E., Lesne O., Deverchere J., Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Levi K.G. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal rift zone, Siberia // Geophys. Res. Letters. 1998. Vol. 25. № 21. P.4003–4007.
  49. Chapmen D.S., Pollack H.N. Regional geotherms and lithospheric thickness. // Geology. 1977. Vol. 5. P. 265–268.
  50. Characteristics of active faults // Spec. Issue J. Struct. Geol. 1991. Vol. 13. № 2. 240 p.
  51. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // Geophys. Res. Lett. 1994. 21. P. 2191–2194.
  52. Dobrethov N.L., Buslov M.M., Delvaux D. et al. Mesozoic and Cenozoic tectonics of Central Asian Mountain Belt:

- effect of lithosphere plates interaction and mantle plumes // Intern. Geol. Rev. 1996. Vol. 38. P. 430–466.
53. International Tectonic Map of the World/Chief Ed. Khain V.E. Academy of Sciences of the USSR and Commission for the Geological Map of the World. 1981.
  54. King R.W., Shen F., Burchfiel B.C., Royden L.H., Wang E., Chen Zh., Liu Yu., Zhang X.-Y., Zhao J.-X., Li Yu. Geodetic measurement of crustal motion in southwest China // Geology. 1997. Vol. 25. № 2. P. 179–182.
  55. Kogan M.G., Steblou G.M., King R.W., Herring T.A., Frolov D.I., Egorov S.G., Levin V.Y., Lerner-Lam A., Jones A. Geodetic constraints on the rigidity and relative motion of Eurasia and North America // Geophys. Res. Lett. 2000. Vol. 27. № 14. P. 2041–2044.
  56. Larson K.M., Burgmann R., Bilham R., Freymueller J.T. Kinematics of the India–Eurasia collision zone from GPS measurements // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. № B1. P. 1077–1093.
  57. Larson K.M., Freymueller J.T., Philipson S. Global plate velocities from the Global Positioning System // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. № B5. P. 9961–9981.
  58. Levi K.G., Lysak S.V. Tectonic movements and thermal evolution of Lithosphere // J. Geodynamics. 1986. Vol. 5. № 2. P. 113–132.
  59. Levi K.G., Sherman S.I. Applied Geodynamics Analysis. Vol. 100. Science Geologiques: Tervuren, Belgique, 1995. 133 p.
  60. Meriaux A.-S., Ryerson F.J., Tapponnier P. et al. Large-scale strain pattern, great earthquakes, and late Pleistocene slip rate along the Altyn Tagh fault (China) // Eos. Fall Meet. Suppl. 1998. V. 79. № 45.
  61. Molnar P., Gipson J.M. A bound on the reology of continental lithosphere using very long baseline interferometry: the velocity of South China with respect to Eurasia // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101. № B1. P. 545–553.
  62. Quiang Zh., Wenyao Zh., Yongqin X. Global plate motion models incorporating the velocity field of ITRF96 // Geophys. Res. Lett. 1999. Vol. 26. № 18. P. 2813–2816.
  63. Reilinger R.E., McClusky S.C., Oral M.B., King R.W., Toksol M.N., Barka A.A., Kinik I., Lenk O., Sanli I. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia–Africa–Eurasia plate collision zone // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № B5. P. 9983–9999.
  64. San'kov V., Deverchere J., Gaudemer Y., Houdry F., Filippov A. Geometry and rate of faulting in the North Baikal Rift, Siberia // Tectonics. 2000. Vol. 19. № 4. P. 707–722.
  65. Shen Zh., Zhao Ch., Yin A., Li Y., Jackson D.D., Fang P., Dong D. Contemporary crustal deformation in East Asia constrained by Global Positioning System measurements // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. № B3. P. 5721–5734.
  66. Sillard P., Altamimi Z., Boucher C. The ITRF96 realization and its associated velocity field // Geophys. Res. Lett. 1999. Vol. 25. № 17. P. 3223–3226.
  67. Tapponnier P., Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baikal regions // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. P. 3444–3459.
  68. Trifonov V.G. World map of active faults // Quarter. Internat. Spec. Issue. 1995. № 25. P. 3–16.
  69. Wang Q., Zhang P., Freymueller J.T., Bilham R., Larson K.M., Lai X., You X., Niu Z., Wu J., Li Y., Liu J., Yang Z., Chen Q. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements // Science. 2001. № 294. P. 574–577.
  70. Ziqing W., Wuxing D., Xianbing W. Crustal movements monitoring in China Mainland // Proc. of the Fourth AS-PG Workshop, Shanghai, P.R.China, 14–19 May, 2001. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2001. P. 106–112.
  71. Zoback M.L. First and second order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map project // J. Geophys. Res. Special Issue. 1992. № 8. P. 11703–11728.