

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОДИНАМИКИ

Труды, вып. 515  
*Основаны в 1932 году*

СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

Ответственные редакторы:  
Ю. О. ГАВРИЛОВ, С. А. КУРЕНКОВ



МОСКВА «НАУКА» 1999

УДК 551.24(470.5)

ББК 26.3

Т 11

**Редакционная коллегия:**

*Ю.Г. Леонов* (главный редактор), *М.А. Ахметьев*, *Ю.О. Гаврилов*,  
*Ю.В. Карякин*, *С.А. Куренков*, *М.А. Семихатов*

**Рецензенты:**

*В.Е. Хаин*, *Т.Н. Хераскова*

**Теоретические и региональные проблемы геодинамики.** – М.: Наука, 1999. – 279 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 515)

ISBN 5-02-002350-7

Сборник посвящен памяти выдающегося ученого Петра Николаевича Кропоткина в связи с его 90-летием. Статьи содержат оригинальные материалы по различным аспектам региональной и теоретической геологии в рамках научных интересов П.Н. Кропоткина. Это прежде всего статьи, посвященные общим и региональным вопросам геодинамики и неотектоники. Рассматриваются методические вопросы палеомагнетизма и история формирования Полярного Урала и Южного Приморья по палеомагнитным данным; обсуждаются проблемы дегазации литосферы Земли и происхождения углеводородов; содержатся научно-биографические сведения и воспоминания о Петре Николаевиче Кропоткине.

Для специалистов, интересующихся общими и региональными вопросами геодинамики, неотектоники, палеомагнетизма и проблемами происхождения углеводородов.

ТП-99-II-177

**Editorial Board:**

*Yu.G. Leonov* (Editor-in-Chief), *M.A. Akhmetiev*, *Yu.O. Gavrilov*,  
*Yu.V. Kariakin*, *S.A. Kurenkov*, *M.A. Semikhatov*

**Reviewers:**

*V.E. Khain*, *T.N. Kheraskova*

**Theoretical and Regional Issues of Geodynamics.** – М.: Nauka, 1999. – 279 p.  
(Transactions of GIN RAS; Vol. 515)

ISBN 5-02-002350-7

The collection of papers consecrated to the memory of Pyotr Nikolaevich Kropotkin is published on occasion of 90th birthday of this outstanding scientist. The papers present original data on various aspects of regional and theoretical geology, which have always been of keen scientific interest for P.N. Kropotkin. First of all, these are the papers concerning the general and regional problems of geodynamics and neotectonics. In addition, particular papers consider some methodical aspects of paleomagnetism and formation history of the Polar Urals and Southern Primorie, and also discuss problems of the Earth's degassing and hydrocarbon origin. The book presents as well the information concerning the scientific biography of P.N. Kropotkin and reminiscences of his colleagues.

This collection is addressed to a broad spectrum of geoscientists who deal with the general and regional issues of geodynamics, neotectonics, paleomagnetism, and the origin of hydrocarbons.

ISBN 5-02-002350-7

© Издательство "Наука", 1999

# СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ОБЛАСТИ АРАВИЙСКО-ЕВРАЗИЙСКОЙ КОЛЛИЗИИ

В.Г. Трифонов\*, Г.А. Востриков\*, Р.В. Трифонов\*, О.В. Соболева\*,  
А.С. Караханян\*\*, В.А. Петров\*\*\*

\*Геологический институт РАН,

\*\*Институт геологических наук НАН Армении,

\*\*\*Объединенный институт физики Земли РАН

## ВВЕДЕНИЕ

Область Аравийско-Евразийской коллизии представляет собой территорию, ограниченную координатами 26–46°с.ш. и 30–60°в.д. и включающую в себя Крым, Кавказ, Турцию, Восточное Средиземноморье, Ближний и Средний Восток, Черное и Каспийское моря, Западную Туркмению и Западный Казахстан (рис. 1). Обилие активных разломов, различающихся направлением и интенсивностью позднечетвертичных перемещений, затрудняет определение генеральных черт современного разломообразования, важного как для понимания закономерностей тектогенеза, так и для оценки сейсмической опасности различных зон и других связанных с ними геологических опасностей. Это побудило нас искать способ определения интегрального деформационного эффекта современного (позднеплейстоцен-голоценового) развития разломов. Таким способом оказался расчет поля тензора скоростей деформации.

## ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для расчетов современной тектонической деформации использовалась база данных об активных разломах региона, созданная в ходе реализации проекта II-2 "Карта крупных активных разломов Мира" (председатель В.Г. Трифонов) Международной программы "Литосфера". В основу базы данных положены материалы полевого изучения активных разломов, подготовленные и частично изложенные в публикациях А. Барка, М. Берберяна, Т.П. Ивановой, А.С. Караханяна, С.И. Кулошвили, Н.В. Лукиной, А.А. Никонова, Ф. Сароглу, В.Г. Трифопова, Л.И. Борисенко, Н. Гарфункеля, А.И. Кожурина, М.Л. Коппа, Е.Е. Милановского, М. Фаршада, Р. Фройнда, Х. Хессами и ряда других исследователей [Barka, 1992, 1996; Berberian, 1976–1977; Hessami, Jamali, 1996; Saroglu et al., 1992; Trifonov et al., 1994, 1996]. Подготавливая эти материалы для расчетов, В.Г. Трифонов всесторонне проанализировал и дополнил имеющиеся сведения. Это в первую очередь касалось скоростей движений по разломам, которые при отсутствии прямых полевых определений, обычно представленных в базе данных, оценивались по косвенным признакам в широких пределах допустимых значений. В итоге для расчетов была составлена новая база данных, включавшая следующие характеристики каждого разлома: направление и углы падения; направление (правое или левое) и скорости сдвиговой компоненты перемещений; направление (взбросо-надвиговое или сбросовое) и скорости вертикальной компоненты перемещений; присутствие и скорости (поперек разлома) растягивающей компоненты перемещений; источник информации; географические координаты точек линии разлома на поверхности, достаточных для ее воспроизведения в масштабе 1:1 000 000. Если какие-либо из этих характеристик варьировали, разлом разделялся на однородные отрезки. Для углов наклона и средних для позднего плейстоцена и голоцена скоростей перемещения приводились

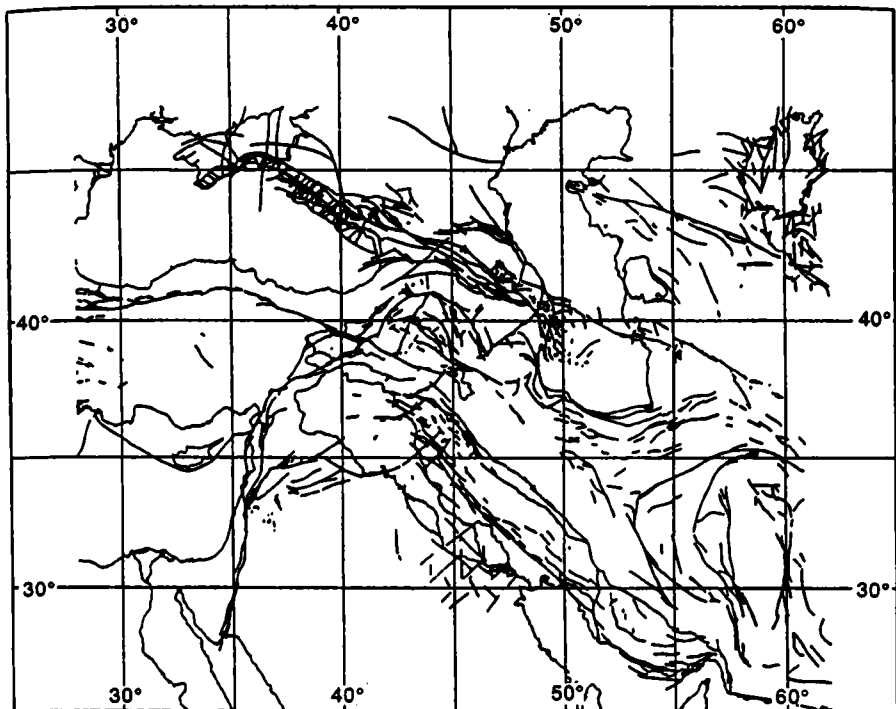


Рис. 1. Активные разломы области Аравийско-Евразийской коллизии

минимальные, наиболее вероятные и максимальные значения. На представленных ниже картах показаны результаты расчетов при наиболее вероятных значениях параметров.

Для расчета компонент тензора сейсмотектонической деформации использовался каталог механизмов очагов землетрясений с  $M > 3,5$ , любезно предоставленный в наше распоряжение О.И. Гущенко, А.О. Майстроковым и В.А. Петровым и включавший в себя для рассматриваемого региона более 300 событий с 1964 по 1992 г. Содержавшиеся в каталоге определения магнитуд  $M$ , и координат землетрясений были выверены О.В. Соболевой по новому Унифицированному каталогу ОИФЗ РАН, составленному под редакцией Н.В. Кондорской и В.И. Уломова.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Методика расчета поля тензора скоростей современной тектонической деформации по данным об активных разломах описана нами ранее [Трифонов и др., 1997; Trifonov et al., 1997]. Она основана на том, что подвижки по разломам (от ползучести и крипа по нарушениям разного ранга до смещений в очаговых зонах сильнейших землетрясений) являются ведущей формой перемещения горных масс в верхнекоровом слое мощностью около 15 км, который и рассматривается в работе. Возможность его обособленного рассмотрения опирается на широкое распространение явлений современного тектонического расслоения литосферы, убедительно обоснованных именно в описываемом регионе [Трифонов, 1983].

В больших пространственно-временных объемах перемещения по активным разломам можно формально рассматривать как элементы процесса течения вязкой

жидкости, важнейшим параметром которого является тензор скорости деформации, связанный при стационарном течении с тензором напряжений коэффициентом вязкости. Для расчета тензора необходимо, чтобы длительность процесса деформирования была намного больше периодов существенных вариаций его скорости, а элементарные площадки перемещений были намного меньше рассматриваемого объема. Позднеплейстоцен-голоценовое время (100 000 лет), на которое нормированы скорости перемещений по активным разломам, заведомо много больше периода повторяемости самых сильных землетрясений в таких подвижных областях, как Кавказско-Аравийский регион. Тем самым условие по времени выполняется. Пространственный объем в нашем случае определяется площадью окна, в котором подсчитываются параметры разломов. Его размер должен быть много больше элементарных площадок, на которые делятся разломы. Но он не может быть и очень большим, чтобы обеспечить достаточную детальность, без которой исследование теряет свою ценность. Значения компонент тензора скорости деформации определялись как эффективные, средние для окна и позднеплейстоцен-голоценового времени.

Все активные разломы региона, за исключением самых непротяженных, разделялись на элементарные площадки длиной  $L = 10\text{--}20$  км с выдержанными простиранием и падением. Краевые участки разломов (5% их общей длины), на которых амплитуда смещения затухает, не учитывались. Второй линейный размер элементарных площадок, их глубина  $L_3$ , для коротких разломов (общая длина  $L < 50$  км) определялась из корреляционного соотношения [Карта..., 1978]:

$$\lg L_3 (\text{км}) = 0,75 \lg L - 0,07, \quad (1)$$

для разломов длиной  $L > 50$  км  $L_3 = 15$  км.

Вводилась величина  $M$ , называемая геометрическим моментом:

$$M = S \cdot L \cdot L_3, \quad (2)$$

где  $S$  – амплитуда вектора скорости перемещения по разлому.  $M$  аналогичен сейсмическому моменту очага землетрясения в том смысле, что, будучи помноженным на коэффициент трения, дает момент силы, действующей на элементарную площадку. Используя декартову систему координат  $X, Y, Z$  (положительные направления на восток, север и в зенит соответственно), рассчитывали компоненты тензора  $M$  с помощью выражения [Костров, 1975]:

$$M_{lm} = M(l_s m_n + l_n m_s), \quad (3)$$

где  $l, m = x, y, z$ , а  $l_n, l_s$  и  $m_n, m_s$  – направляющие косинусы локальной системы координат элементарной площадки ( $n$  – нормаль к ней,  $s$  – направление вектора смещения). Величины  $M_{lm}$  подсчитывались для каждой площадки. Средний для окна тензор скорости деформации определяли, следуя Б.В. Кострову [1975], с помощью выражения:

$$\dot{\epsilon}_{lm} = \frac{1}{2} \frac{\sum M_{lm}^{(n)}}{\Delta V \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество площадок в пределах окна,  $V$  – площадь окна, помноженная на мощность исследуемого слоя  $\leq 15$  км,  $T$  – интервал времени (100 000 лет).

Вдоль географических параллелей и меридианов исследуемый регион разделялся на окна двух типов: размером  $1 \times 1,25^\circ$  без перекрытия и  $3 \times 3,75^\circ$  с шагами  $1 \times 1,25^\circ$  соответственно. В маленьких окнах вычислялись направления главных осей, а в больших – главные значения тензоров скоростей деформации  $M_1, M_2, M_3$ .

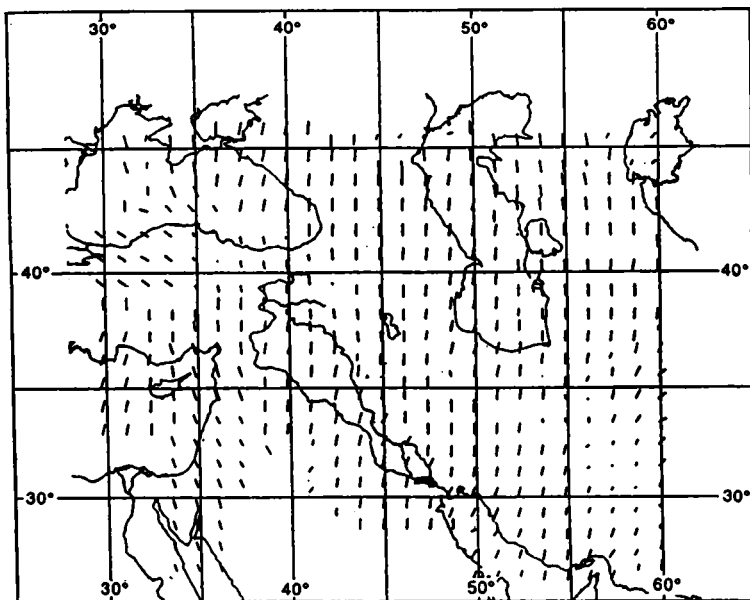


Рис. 2. Поле тензора скоростей современной тектонической деформации области Аравийско-Евразийской коллизии по данным об активных разломах: ориентировка осей наибольшего укорочения  $M_3$ , рассчитанная для окон  $1 \times 1,25^\circ$ . Длина осей пропорциональна их углу с вертикалью

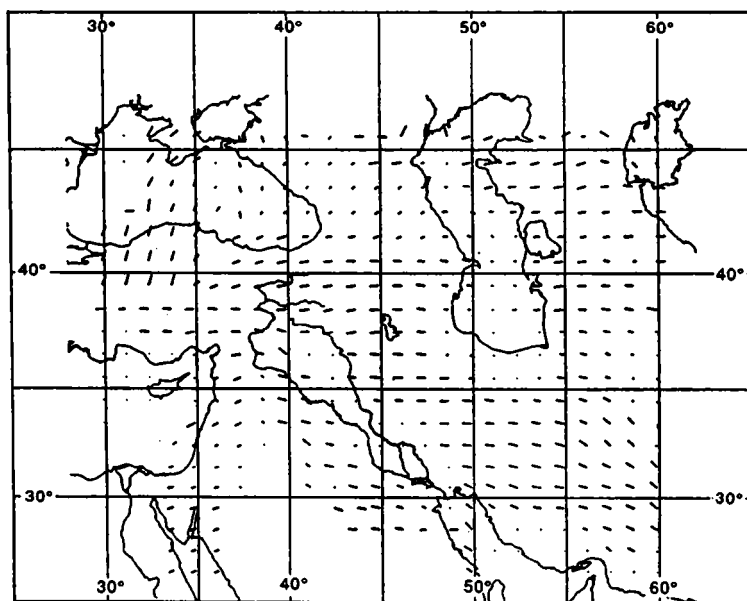
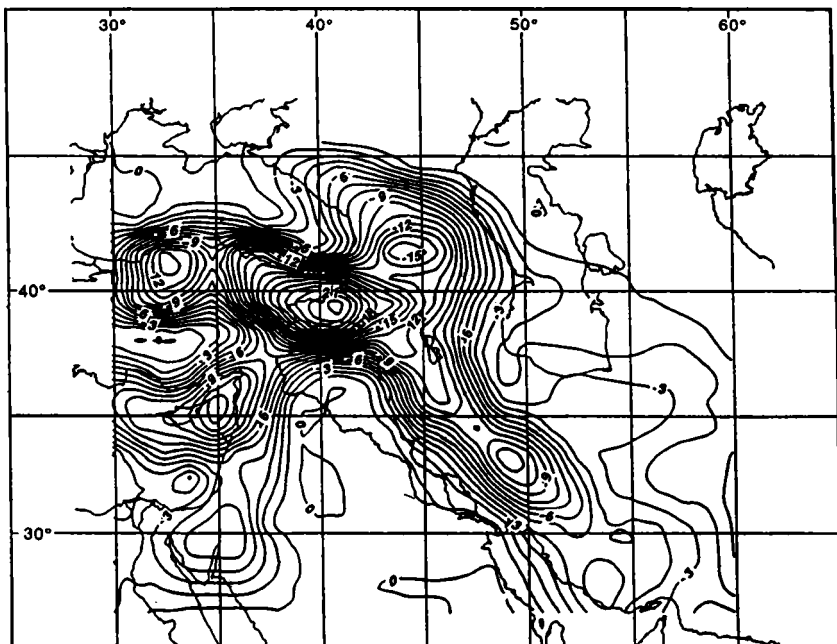
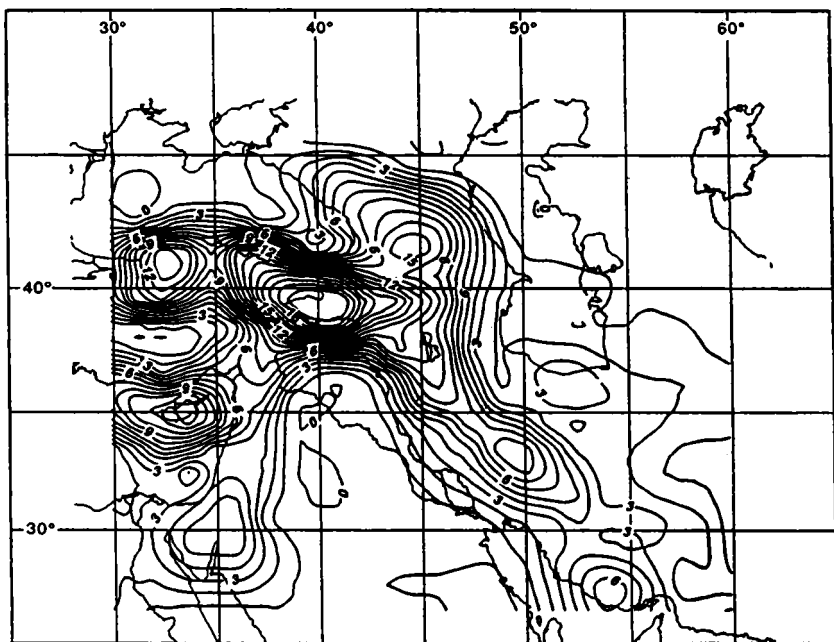


Рис. 3. Поле тензора скоростей современной тектонической деформации области Аравийско-Евразийской коллизии по данным об активных разломах: ориентировка осей наибольшего удлинения  $M_1$ , рассчитанная для окон  $1 \times 1,25^\circ$ . Длина осей пропорциональна их углу с вертикалью



**Рис. 4.** Поле тензора скоростей современной тектонической деформации области Аравийско-Евразийской коллизии по данным об активных разломах: величины скоростей наибольшего укорочения ( $M_3 \times 10^9$ ), рассчитанные для окон  $3 \times 3,75^\circ$



**Рис. 5.** Поле тензора скоростей современной тектонической деформации области Аравийско-Евразийской коллизии по данным об активных разломах: величины скоростей наибольшего удлинения ( $M_1 \times 10^9$ ), рассчитанные для окон  $3 \times 3,75^\circ$

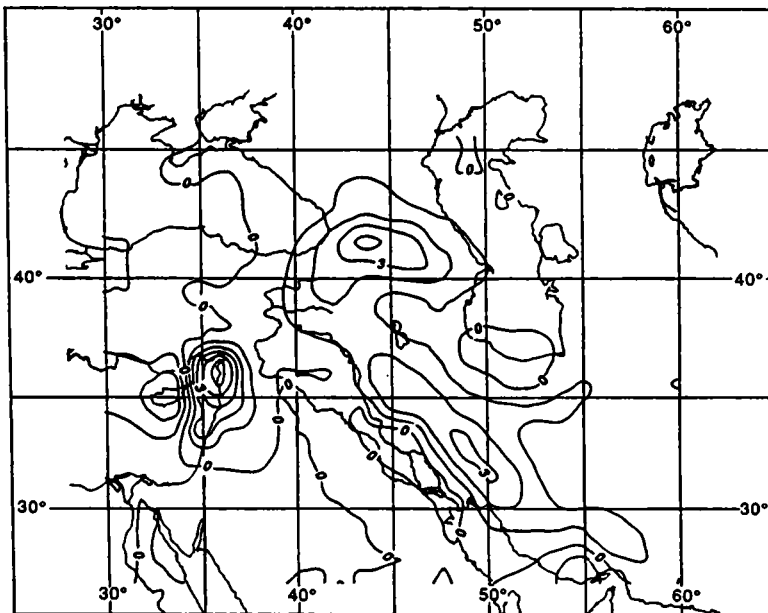


Рис. 6. Поле тензора скоростей современной тектонической деформации области Аравийско-Евразийской коллизии по данным об активных разломах: величины скоростей вдоль осей промежуточной деформации ( $M_2 \times 10^9$ ), рассчитанные для окон  $3 \times 3,75^\circ$

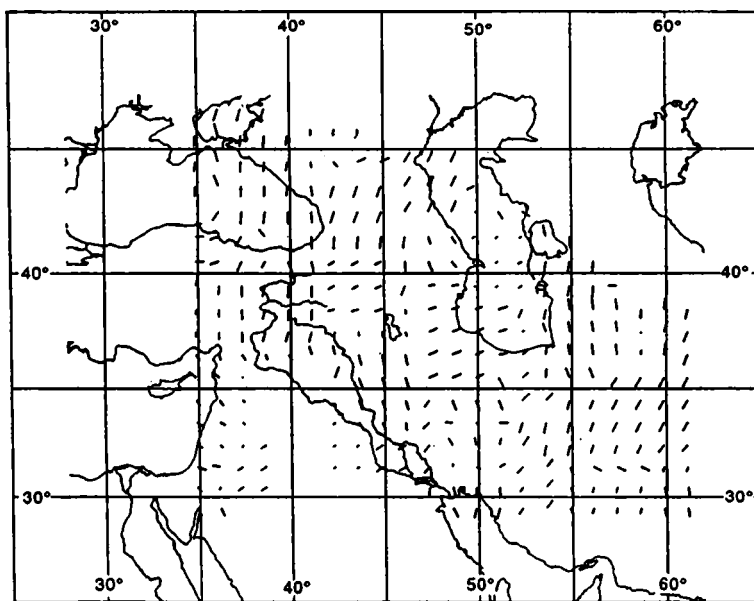
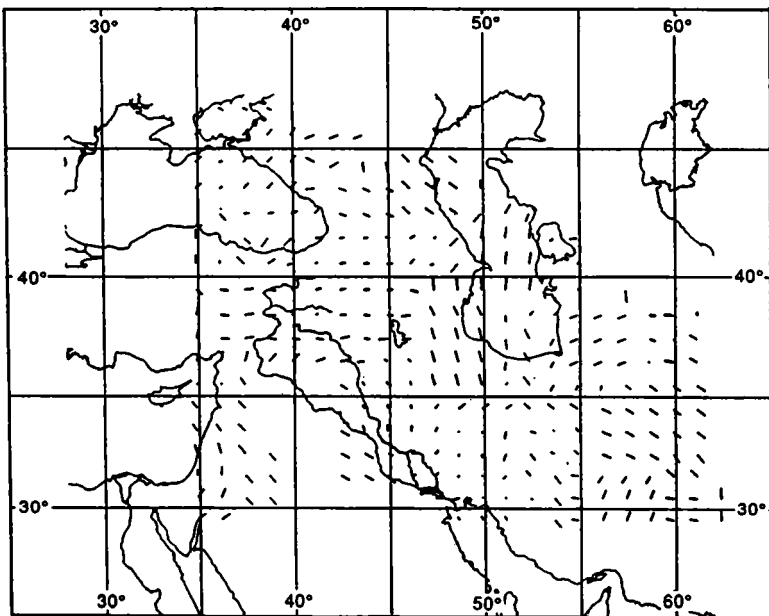
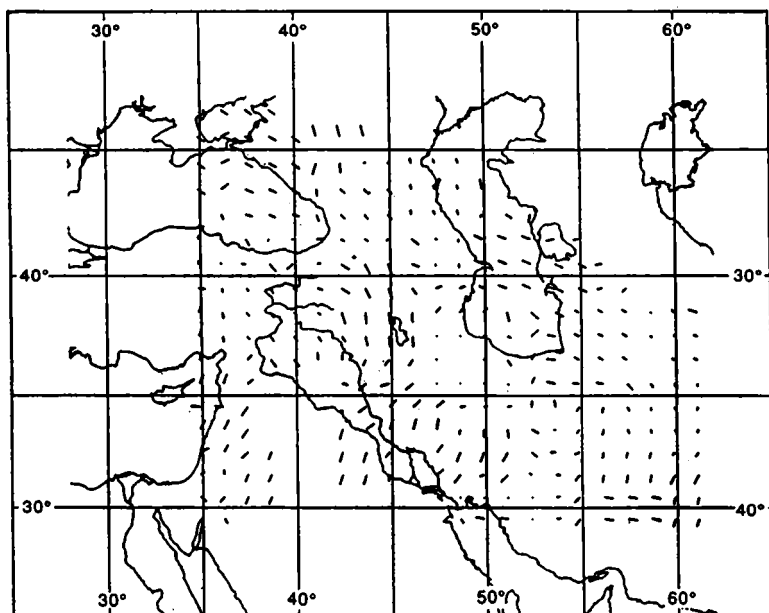


Рис. 7. Поле тензора сейсмотектонической деформации области Аравийско-Евразийской коллизии по данным об очагах землетрясений: ориентировка осей наибольшего укорочения, рассчитанная для окон  $3 \times 3^\circ$ . Длина осей пропорциональна их углу с вертикалью





**Рис. 8.** Поле тензора сейсмоструктурной деформации области Аравийско-Евразийской коллизии по данным об очагах землетрясений: ориентировка осей наибольшего удлинения, рассчитанная для окон  $3 \times 3^\circ$ . Длина осей пропорциональна их углу с вертикалью



**Рис. 9.** Поле тензора сейсмоструктурной деформации области Аравийско-Евразийской коллизии по данным об очагах землетрясений: ориентировка осей промежуточной деформации, рассчитанная для окон  $3 \times 3^\circ$ . Длина осей пропорциональна их углу с вертикалью

Аналогичным образом рассчитывались компоненты тензора сейсмостектонической деформации. Формула (3) в этом случае описывала тензор сейсмического момента единичного землетрясения, где  $M$  – величина сейсмического момента, вычисляемая из корреляционной зависимости от магнитуды, а выражение в скобках – направленность тензора сейсмического момента, т.е. механизм очага землетрясения. Тензор сейсмостектонической деформации вычислялся по формуле (4) как сумма тензоров механизмов очагов единичных землетрясений, возникших в пределах объема  $V$  за период времени  $T$ . В качестве таких объемов были выбраны скользящие окна  $3 \times 3^\circ$  с шагом  $1^\circ$  вдоль географических параллелей и меридианов.

С применением изложенной методики была составлена серия карт, характеризующих поле тензора скоростей современной (позднечетвертичной) тектонической деформации по данным об активных разломах (рис. 2–6) и поле тензора сейсмостектонической деформации по данным о механизмах очагов землетрясений (рис. 7–9). Рис. 2–6, повторяем, представляют результаты расчетов при наиболее вероятных значениях углов наклона разломов и средних скоростей перемещений по ним.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наибольшее укорочение на большей части территории ориентировано субгоризонтально и субмеридионально (см. рис. 2), отражая воздействие северного дрейфа Аравийской плиты. В районах Лутской впадины и вулкана Арарат укорочение становится субвертикальным, указывая на локальное растяжение и сбросообразование, а в Северо-Анатолийской и Левантской зонах разломов, на юге Внешнего Загроса, на восточном обрамлении Лутской впадины и востоке Туркмено-Хорасанских гор (Беналуд), оно, будучи субгоризонтальным, изменяет направление в соответствии с изменением направления течения горных масс на северо-западное к западу от оси Аравийского клина и северо-восточное к востоку от оси. Наибольшее удлинение на большей части территории субгоризонтально и субширотно, хотя варьирует в большей мере, чем укорочение (см. рис. 3). Оно становится почти вертикальным на Большом Кавказе и его южном склоне, в Южнокаспийской и Централнокаспийской впадинах, Эльбурсе и Беналуде, Внешнем Загросе и Макране, Восточных Пальмиридах и на севере Аравийской плиты к югу от Пальмирид, свидетельствуя об условиях надвигообразования и складчатости. На западе Северо-Анатолийской зоны относительное удлинение приобретает ССВ–ЮЮЗ простираение, отражая изменение движения Анатолийской плиты с западного на восточное на юго-западное на западе Анатолии. Вместе с тем, на большей части территории оси как укорочения, так и удлинения сохраняют субгоризонтальную ориентировку, указывающую на преобладание сдвигового типа перемещений. Такая же особенность была установлена нами ранее для области Индо-Евразийской коллизии [Трифонов и др. 1997; Trifonov et al., 1997]. Она характеризует сдвиги как энергетически наиболее экономную форму перемещений блоков континентальной коры.

Величины наибольшего удлинения и укорочения (см. рис. 4, 5) достигают максимальных значений на стыке Северо-Анатолийской, Восточно-Анатолийской и Загросской активных зон, т.е. на северном фронте Аравийской плиты, а также на стыке Малого и Большого Кавказа, в Северо-Анатолийской зоне, Загросе, на стыке Кипрской дуги и Левантской зоны. Меньшие, но достаточно высокие значения характеризуют южную (израильскую) часть Левантской зоны и Южный Загрос, а также весь Малый Кавказ и значительную часть Большого Кавказа. Иначе говоря, области наибольших скоростей деформации приурочены к широким зонам на границах плит и микроплит, причем для Анатолийской плиты ширина этих зон соизмерима с шириной слабо деформированной части плиты.

Величины наибольшего укорочения и удлинения обычно близки, что свидетельствует о преимущественно двуслойной деформации. Значимые различия этих величин, преобладание укорочения над удлинением (см. рис. 6), появляются в Загросе, Левантской зоне и на Малом Кавказе. Первый из указанных районов отличается значительным раннечетвертичным вулканизмом, а в двух других такой вулканизм продолжался до голоцена. Вероятно, двуслойное растяжение, появляющееся в такой ситуации, благоприятно для вывода на земную поверхность магматического материала из глубинной аномально разогретой зоны (Левант-Центральный Кавказ, в северной части совпадающая с Транскавказским поперечным поднятием Е.Е. Милановского [1968]). Возможно, оно способствовало и возникновению местных коровых очагов магмообразования во фронте пологого поддвига Аравийской плиты (Загрос).

Сопоставление ориентировок главных осей тензора современной тектонической деформации, рассчитанной по данным об активных разломах, и сейсмотектонической деформации, рассчитанной по параметрам очагов землетрясений (см. рис. 7–9), показало их принципиальное сходство. Но обнаруживается много различий в деталях. Наиболее важными отличиями представляются северо-восточные ориентировки осей сейсмотектонического укорочения на западном побережье Центрального и Южного Каспия, в Талыше и Эльбурсе при северо-западном сейсмотектоническом удлинении, что указывает на развитие здесь субмеридиональных правых и субширотных левых сдвигов, весьма неполно, особенно в Южном Каспии, подтвержденных геолого-геоморфологическими данными об активных разломах. Вместе с тем, левый сдвиг вдоль Эльбурса подтвердился определениями механизма очага и типа сейсмогенного разрыва на поверхности при Рудбарском землетрясении 1990 г. [Berberian et al., 1992]. Вероятно, субширотные левые сдвиги играют в Северном Иране большую роль, чем им отводилась прежде. Что же касается центральных частей впадин Южного и особенно Центрального Каспия, то субвертикальная ориентировка сейсмотектонического укорочения, при субгоризонтальном положении наибольшего удлинения и оси промежуточной деформации, свидетельствует о сбросовых сейсмических подвижках, проявившихся, в частности, при сильных землетрясениях 1980 и 1984 гг.

Выявленные различия тектонической и сейсмотектонической деформации обусловлены отчасти неполнотой исходных данных, т.е., с одной стороны, недостаточно полным обнаружением активных разломов и неточным определением направлений перемещений по ним, а, с другой стороны, ошибками определения механизмов очагов. Но главная причина различий заключается в различиях временного интервала: активные разломы представляют усредненный эффект многих тысячелетий, а механизмы очагов – 30-летний период, не позволяющий оценить и учесть многолетние и вековые вариации напряженно-деформированного состояния среды. Намечается и еще одно отличие сейсмотектонической деформации от тектонической: она предполагает более существенные вертикальные смещения поверхности. Вероятно, это связано с тем, что в процессах сейсмогенеза, в большей степени, чем в развитии активных разломов, имеют значение не только латеральные перемещения плит и крупных блоков литосферы, но и внутрикоровые процессы преобразования вещества, изменяющие его объем и соответственно напряженно-деформированное состояние потенциальных очаговых зон.

## ВЫВОДЫ

Выполненное исследование современной геодинамики сложно построенной области Аравийско-Евразийской коллизии позволило получить реальную картину деформированного состояния этого региона, созданного перемещениями горных масс как поперек, так и вдоль орогенического пояса в результате северного дрейфа

Аравийской плиты. Суммарное поперечное укорочение Кавказско-Аравийского региона по данным об активных разломах достигает 2–3 см/год. С деформированным состоянием связаны сейсмичность и отчасти вулканизм. Выявлены и количественно охарактеризованы области наиболее интенсивных современных деформаций, обладающие повышенной сейсмической опасностью и опасностью других геоэкологических бедствий (оползни, сели, аномальные эрозия и седиментация, гидрогеологические аномалии, мутагенные и патогенные воздействия тектонически активных зон).

Выше были изложены результаты исследования, оказавшегося возможным благодаря поддержке Международного научного фонда (проекты МРЮОО, руководитель В.Г. Трифонов, и РҮҮООО, руководитель А.С. Караханян, 1993–1995 гг.) и Подпрограммы "Глобальные изменения природной среды и климата" (проект 1.1.4, руководитель В.Г. Трифонов, 1996–1997 гг.) Российской ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения".

## ЛИТЕРАТУРА

- Карта разломов территории СССР и соседних областей / Ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1978.
- Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
- Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 484 с.
- Трифонов В.Г.* Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука, 1983. 224 с.
- Трифонов В.Г., Востриков Г.А., Трифонов Р.В., Соболева О.В.* Активные разломы Евразии: Геодинамический аспект // Тектонические и геодинамические феномены / Ред. А.С. Перфильев. М.: Наука, 1997. С. 174–195.
- Barka A.A.* The North Anatolian fault zone // *Ann. Tecton.* 1992. Vol. 6. Suppl.: (Special Issue). P. 164–195.
- Barka A.A.* Active faults of Turkey // *J. Earthquake Predict. Res.* 1996. Vol. 5, N 3. P. 413–421.
- Berberian M.* Contribution to the seismotectonics of Iran. Tehran: Geol. Survey of Iran, 1976. Pt. 1. 516 p.; 1997. Pt 2. 278 p.
- Berberian M., Qorashi M., Jackson J.A., Priestley K., Wallace T.* The Rudbar-Tarom earthquake of 20 June 1990 in NW Persia: Preliminary field and seismological observations, and its tectonic significance // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1992. Vol. 82, N 4. P. 1726–1755.
- Hessami K.T., Jamali F.H.* Active faulting in Iran // *J. Earthquake Predict. Res.* 1996. Vol. 5, N 3. P. 403–412.
- Saroglu F., Emre O., Kuscu I.* Active fault map of Turkey, 1:1 000 000. Ankara: Dir. of Mineral Resources and Explor., 1992.
- Trifonov V.G., Karakhanian A.S., Kozhurin A.I.* Major active faults of the collision area between the Arabian and Eurasian plates // *Continental collision zone earthquakes and seismic hazard reduction* / Ed. B.A. Bolt, R. Amirbekian. Yerevan: IASPEI/IDNDR publ., 1994. P. 56–76.
- Trifonov V.G., Karakhanian A.S., Berberian M.* et al. Active faults of the Arabian plate bounds, in the Caucasus and Middle East // *J. Earthquake Predict. Res.* 1996. Vol. 5, N 3. P. 363–374.
- Trifonov V.G., Vostrikov G.A., Trifonov R.V., Soboлева O.V.* Recent upper crust geodynamics of central Asia // *Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus* / Ed. D. Giardini, S. Balassanian. Dordrecht: Kluwer, 1997. P. 109–120.