

УДК 550.34

ПОЛЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО МЕХАНИЗМАМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КИТАЯ

© 2008 г. В. А. Петров¹, Niu Anfu⁴, В. Б. Смирнов^{2,3}, А. О. Мострюков¹, Li Zhixiong⁴,
А. В. Пономарев², Jiang Zaisen⁴, Shen Xuhui⁴

¹Геофизическая обсерватория “Борок”, ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, пос. Борок (Ярославская обл.)

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁴Институт наук о землетрясениях, КАЗ, г. Пекин, Китай

Поступила в редакцию 14.05.2008 г.

Проведено сопоставление ориентаций главных осей поля тектонических напряжений, реконструированного по сейсмологической информации о механизмах очагов землетрясений, и поля деформаций по данным наблюдений GPS-измерений на территории Китая.

В работе использованы данные GPS-измерений, полученные системой наблюдений CMONOC (Crustal Movement Observation Network of China – около 1000 станций) за период с 1998 по 2004 годы. На основе информации о современных горизонтальных движениях земной коры, с использованием методики конечных элементов, получено поле деформаций для исследуемой территории. Расчеты тензора деформаций по GPS-измерениям проведены с шагом 1° по широте и долготе.

При реконструкции компонент поля тектонических напряжений использован каталог фокальных механизмов очагов землетрясений. Для расчета механизмов очагов землетрясений использована сейсмологическая информация о знаках первых вступлений из бюллетеня Международного Сейсмологического Центра (ISC). Для оценки характеристик регионального поля напряжений применена методика, в основе которой лежит кинематический метод, предложенный О.И. Гущенко. Реконструкция поля тектонических напряжений проводилась по данным о механизмах очагов землетрясений за периоды с 1998–2004 годы и за 1985–2004 годы для независимых глубинных интервалов ($0 < H < 35$ км; $35 < H < 70$ км).

Сопоставление направлений главных осей поля деформаций на поверхности (по GPS-измерениям) и направлений главных осей поля напряжений (реконструированного по механизмам очагов землетрясений) показало их хорошую сходимость. Сейсмотектонические деформации и GPS-измерения для большей части территории совпадают. Лучшее совпадение наблюдается для глубинного интервала $0 < H < 35$ км. Наибольшая величина рассогласования приурочена к областям с высоким пространственным градиентом направлений осей направлений деформаций, и, возможно, связана с неоднородностью строения областей, к зонам с однотипными деформациями по обоим горизонтальным осям (сжатие или растяжение во всех направлениях) или областям с малыми абсолютными значениями современных горизонтальных движений. Выделяются области с неизменными направлениями осей напряжений, независимо от глубинной привязки исходных данных. Хорошая сходимость результатов, полученных двумя различными методами, позволила проверить метод реконструкции поля напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений.

Ключевые слова: GPS-измерения, поле тектонических напряжений, механизм очагов землетрясений.

PACS: 91.30.Dk

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень исследований деформационных процессов в земной коре и литосфере Земли невозможен без информации о действующих в ней тектонических напряжениях. Напряженное и деформированное состояние земной коры и верхней мантии являются важнейшими из

факторов, определяющих характер тектонических процессов и развитие связанных с ними тектонических движений, деформаций, складок и разрывов.

В этом контексте разработка методов и подходов по реконструкции полей тектонических напряжений относится к числу актуальных проблем

тектонофизики, геотектоники и сейсмологии. Решение этой проблемы имеет огромное значение для целого ряда теоретических и практических задач геофизики, геологии и горного дела и тесно связана с проблемой прогноза землетрясений, с вопросами интерпретации современных движений, прогнозированием сейсмической опасности, исследованиями физики явлений, протекающих в очаговой области до, во время и после землетрясения.

В настоящее время разработана целая серия методов реконструкции тензоров напряжений и деформаций, в основе своей использующих как различные физические принципы, так и различные данные. Наиболее полный обзор и анализ методов реконструкции тектонических напряжений опубликован в работах Ш.А. Мухамедиева [Мухамедиев, 1993; Мухамедиев и др., 2005] и Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий, 1999; 2002; 2007]. Информация, получаемая этими методами, бесспорно, имеет огромное значение для решения различных теоретических и практических задач геофизики, геологии, горного дела. Но дискуссии и споры между авторами о достоинствах и недостатках методов не затихают. Верификации методов даже между собой не проводилось. А для проверки правильности региональных реконструкций поля напряжений и деформаций, полученных разными методами на основе геологических или сейсмологических данных, до последнего времени просто не было методов, дающих инструментальную информацию по большим регионам.

Характер деформирования земной коры вызывает в настоящее время большой интерес и дискуссии в новейшей геотектонике. В работах [Гатинский и др., 2005; Зубович и др., 2004; Мухамедиев и др., 2006; Parsons, 2006] изучался вопрос о выделении блоков в пространственном поле скоростей горизонтальных движений для решения геодинамических задач. В последнее время для решения геодинамических задач все активнее используются информация по GPS-измерениям (Global Positioning System) и других систем позиционирования. Благодаря этим данным были созданы новые глобальные модели движения литосферных плит, подробно исследованы региональные характеристики современных деформаций земной коры. Важным результатом этих исследований, на наш взгляд, является несоответствие и рассогласование во многих случаях GPS-измерений с геологическими построениями и сейсмологическими данными. Количественная величина и природа этого рассогласования не вполне ясны.

В настоящей работе проведено сопоставление результатов реконструкции поля тектонических напряжений по информации о механизмах очагов землетрясений с GPS-измерениями современных

горизонтальных перемещений земной поверхности. Это сопоставление проводилось с целью, с одной стороны, выяснения, в какой мере наблюдения GPS-измерений на поверхности отражают деформации в толще литосферы, а с другой стороны, верификации метода реконструкции поля напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений.

ДАННЫЕ О СОВРЕМЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ КИТАЯ

В работе использована информация о современных горизонтальных движениях земной коры, полученная в Китае системой наблюдений CMONOC (Crustal Movement Observation Network of China). В состав этой системы входит около 1000 станций. Из них 25 станций с непрерывной регистрацией, на 56 станциях регистрация проводится с частотой опроса в 1 год, на остальных станциях опрос ведется раз в 2 года. В отдельных случаях и по необходимости часть станций может переходить на непрерывную регистрацию. Положение станций сети на территории Китая и распределение скоростей перемещений для этих станций представлено на рис. 1. Как видно из рисунка, пространственное распределение станций весьма неравномерно, основное количество станций расположено в восточной части территории Китая. Западная часть системы наблюдений в настоящее время представлена редкой сетью станций, что обусловлено, в первую очередь, труднодоступностью территорий и их слабой заселенностью.

В Китае технологии космической геодезии по определению скоростей современных движений земной коры начали интенсивно развиваться с 1998 года. Эти наблюдения дали важную информацию о характере движения и деформирования земной поверхности. Полученная информация о скоростях современных движений земной коры территории Китая и результаты ее обработки отражены в большом числе публикаций. Не касаясь в данной статье узкоспециализированных аспектов обработки самих данных, необходимо отметить основные достижения, полученные в области изучения деформированного состояния зоны сочленения Индийской и Азиатской плит. Получение GPS-измерений, их анализ и обобщение позволили выявить особенности параметров современных движений и особенности деформирования как всего Азиатского региона в целом [Гатинский и др., 2005; Larson et al., 1999], так и его отдельных областей [Зубович и др., 2004; Мухамедиев и др., 2006; Chen et al., 2000], получить для территории Китая пространственное распределение деформаций [Ma et al., 2001; Liang et al., 2003a; Liang et al., 2003b; Ying et al., 1999]. Изучение особенностей характера движений земной коры по GPS-измере-

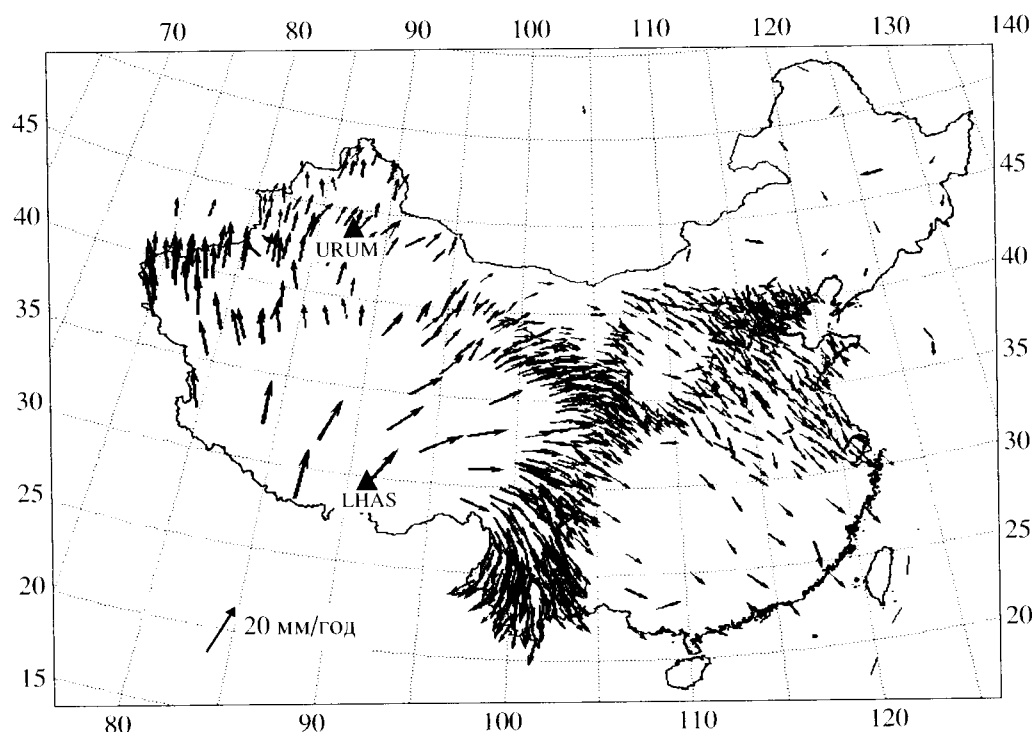


Рис. 1. Распределение скоростей перемещений по данным GPS-измерений для территории Китая.

ниям позволило выявить связь между деформированием областей и сейсмичностью. Эти результаты успешно использованы для прогноза землетрясения 14.11.2001 г. с магнитудой $M = 8.1$ [Liang et al., 2003a; Liang et al., 2003b; Gu et al., 2004].

В настоящей работе использованы результаты вычисления тензора скоростей деформаций по данным о GPS-измерениях, полученные в работе [Liang et al., 2003b] для территории Китая. Для оценки скорости горизонтальных перемещений земной коры на основе реальных GPS-измерений и данных о тектоническом строении территории Китая был применен метод конечных элементов. Расчеты тензора скоростей деформаций проведены с шагом 1° по широте и долготе по данным за период с 1998 по 2004 годы (рис. 2). На этом рисунке показана пространственная ориентировка осей относительного растяжения (рис. 2а), а оси относительного сжатия приведены на рис. 2б. Авторы [Liang et al., 2003b] отмечают, что полученные результаты позволили выявить основные тенденции движения земной коры территории Китая. Но полученная информация о поле деформаций для территории Китая требует дальнейшего уточнения. Необходимость уточнения полученной информации авторы связывают с недостаточной точностью полученных результатов моделирования, обусловленной, в первую очередь, неравномерным распределением станций и необходимостью дальнейшего совершенствова-

ния методики расчетов с привлечением дополнительных данных.

МЕТОДИКА РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Для реконструкции поля тектонических напряжений использовался кинематический метод, предложенный О.И. Гуценко [Гуценко, 1979b]. Его развитие позволило разработать алгоритм описания пространственно-временных изменений характеристик регионального поля напряжений с учетом исходной точности и многовариантности определения механизма очагов землетрясений [Гуценко и др., 1990]. В работах [Гуценко, 1979а; 1979b; 1982; Petrov et al., 1994; Петров и др., 2002] описана методика выделения по совокупности механизмов очагов землетрясений информации о направлениях осей главных напряжений. Необходимость описать еще раз методику реконструкции поля тектонических напряжений по сейсмологической информации о механизмах очагов землетрясений возникла в связи с поставленными перед данной статьей задачами. При описании методики мы постарались выделить основные ее особенности, влияющие, на наш взгляд, на точность определения направлений главных осей тензора напряжений (σ_1 , σ_2 , σ_3). Понимание и учет этих особенностей, возможно, позволит при сравнении полученной информации о направлениях осей тензора напряжений с осями тензора скоростей деформа-

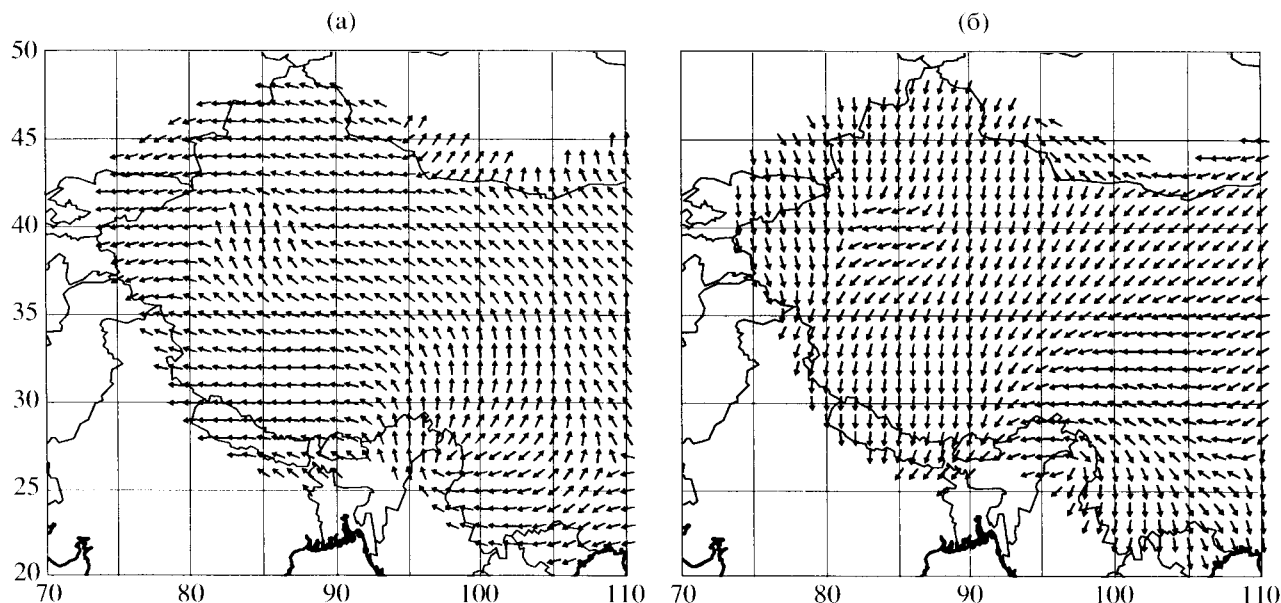


Рис. 2. Результаты моделирования пространственного распределения осей деформаций (растяжения и сжатия) с учетом их величины ($\times 10^{-9}$ в год) по данным GPS-измерений. (а) – ориентировка осей относительного растяжения. (б) – ориентировка осей относительного сжатия.

ций по данным о GPS-измерениях объяснить возможные причины их расхождения.

Для пространственной реконструкции главных осей тензора напряжений исследуемый регион разбивается равномерной сеткой с определенным шагом. Шаг сетки зависит, в первую очередь, от предполагаемых задач исследования и от количества исходной информации о механизмах очагов землетрясений. В окрестностях каждого узла этой сетки из общего каталога формируются круговые в плане выборки (элементарные ячейки) по заданному радиусу и начальному (минимальному) количеству механизмов очагов землетрясений, необходимых для локализации диапазона направлений, допустимых для ориентации осей σ_1 и σ_3 . В наших исследованиях такая минимальная совокупность должна содержать не менее 20 механизмов очагов землетрясений. Выборки, при заданном радиусе, не включающие в себя такого минимального количества механизмов очагов землетрясений, из дальнейшего расчета исключаются. Внутри элементарной выборки отобранные землетрясения выстраиваются по степени близости координат землетрясений к координатам узла. В дальнейшем мера удаленности механизмов очагов землетрясений от узлов определяет порядок их суммирования.

Прежде чем перейти к методике определения характеристик регионального поля напряжений, определим термины, используемые при ее описании. Напомним, что в сейсмологии диаграмма направленности сдвигового источника для P -волн характеризуется квадрантным распределением

областей сжатия и растяжения. Две нодальные плоскости, разделяющие чередующиеся квадранты и характеризующие сдвиговую подвижку в очаге землетрясения, являются двумя взаимно ортогональными и равновероятными для реализации направлениями. В механизме очага землетрясения два накрест лежащих квадранта сферического пространства, в пределах которых фиксируются отрицательные знаки для первых смещений в волнах P (квадранты растяжения), соответствуют областям этого пространства, запретным для направления оси σ_1 . Тогда как два других квадранта, с положительными знаками первых вступлений волн P (квадранты сжатия), являются запретными для направления оси σ_3 . В соответствии с этим следует ожидать в пределах однородного объема для всей совокупности механизмов очагов землетрясений проявления устойчивых по ориентации двух взаимно ортогональных направлений. Одно из этих направлений не перекрывается на стереограммах соответствующими этим механизмам квадрантами растяжения, тогда как другое направление оказывается не перекрытым для всей совокупности квадрантами сжатия. При этом первое из указанных направлений должно совпадать с направлением оси σ_1 , а другое – с осью σ_3 . Следовательно, для определения направлений этих осей достаточно расчета двух стереограмм, одна из которых является сводной для всей совокупности площадей сферы, перекрытых квадрантами растяжения (запретных для направления оси σ_1), а другая – сводной для квадрантов сжатия (запретных для оси σ_3). Выделение областей стерео-

граммы, не перекрывающихся соответствующими квадрантами, позволяет локализовать области, допустимые для направлений главных осей напряжений. Для выделения этих направлений необходимо учитывать точность определения механизмов очагов землетрясений и многовариантность (несколько определений механизма одного и того же землетрясения) их определений. Эти общие предпосылки были положены О.И. Гуценко в основу кинематического метода реконструкции напряжений. Более подробно рассмотрим алгоритм определения ориентации главных осей напряжений в элементарном объеме.

Определение области допустимой ориентации главных осей растяжения и сжатия (будем обозначать эти оси как σ_1 и σ_3 соответственно) осуществляется путем последовательного суммирования (наложения) в стереографической проекции нижней полусферы всех площадей одноименных для механизмов квадрантов – отдельно для квадрантов сжатия и растяжения (с учетом точности и многовариантности исходных данных) для суммируемых механизмов [Гуценко, 1979а; 1981; 1982]. Эта область для оси σ_3 локализуется как область минимальных значений плотности для квадрантов растяжения, а для σ_1 – для квадрантов сжатия. Локализация областей для главных осей производится при частоте опроса по всей поверхности полусферы с шагом около 6° (выделено нами). Направления главных осей напряжений вычисляются как геометрические центры выделенных пучков направлений, содержащих варианты взаимоортогональных ориентировок осей σ_1 и σ_3 , если такие варианты имеются. В этом случае механизмы очагов всей выборки в целом считаются согласующимися, а поле напряжений в исследуемом объеме однородным по ориентации главных осей.

В алгоритме суммирование зон запретов производится без проверок до тех пор, пока на суммарных диаграммах (на одной или на двух) остаются области с нулевыми значениями плотности. Нулевые значения плотности на диаграммах могут остаться до конца суммирования и в тех случаях, когда при заданном радиусе выборки вблизи узла находится ограниченное количество механизмов очагов или в выборке все механизмы согласуются между собой. В этом случае при достижении заданной величины радиуса выборки в областях решения находятся взаимоортогональные варианты и вычисляются направления главных осей напряжений. После этого счет прекращается. Когда данных в выборке достаточно, суммирование продолжается до тех пор, пока на одной из диаграмм (или на двух одновременно) не исчезает область с нулевыми значениями плотности. Это происходит в случае появления, как минимум, одного механизма, противоречащего (в дальнейшем их мы будем называть несогласующимися) любому направлению одной или двух осей как по

причине возможной погрешности своего определения, так и по причине дефектов используемой при определении механизмов модели разрывообразования. После его появления начинается анализ каждого шага суммирования – проверяются размеры областей с минимальной плотностью на каждой из диаграмм и наличие в них взаимоортогональных вариантов направлений осей. Если при существовании взаимоортогональных вариантов размеры областей с минимальной плотностью больше заданных (*в нашем алгоритме их размеры ограничены 20°* – выделено нами), то суммирование продолжается. В случае отсутствия взаимоортогональных вариантов в областях решения с минимальной плотностью данный несогласующийся механизм отбрасывается и счет прекращается на предыдущем шаге. Аналогично поступаем, когда ортогональных вариантов нет сразу после включения в выборку первого несогласующегося механизма. И в том и в другом случае, когда величина отклонения от ортогональности направлений σ_1 и σ_3 выходит за пределы 6° , выборка очагов считается несогласующейся, а поле напряжений для данного объема неоднородным в пространстве или возможно и во времени. При этом величина отклонения от ортогональности рассматривается в качестве меры рассогласования механизмов очагов (или уровня шума) в данной выборке.

В процессе суммирования возникают случаи, когда размер области для одной оси меньше 20° , а для другой больше этой величины (возможное указание на механизм деформирования, близкий к одноосному сжатию или растяжению). Такой случай нами рассматривается как промежуточный, и после вывода найденных направлений σ_1 и σ_3 суммирование продолжается. Завершение счета по малым размерам областей с минимальной плотностью и наличие взаимоортогональных пар решений на двух диаграммах принимается нами как надежное и взаимосогласованное нахождение ориентации осей главных напряжений σ_1 и σ_3 .

После завершения счета проводится анализ исходной информации о механизмах очагов землетрясений, по которым определены направления осей главных напряжений. Для этой совокупности вычисляется новый радиус выборки (характеризующий размер элементарного однородного объема), количество механизмов в выборке, координаты геометрического центра этих данных. С этими новыми координатами полученные направления осей главных напряжений заносятся в базу данных.

Как отмечалось выше, это алгоритм определения направлений главных напряжений σ_1 и σ_3 в элементарной ячейке (выборке). Аналогичные расчеты проводятся во всех узлах (удовлетворяющих начальным параметрам) сетки для исследуемой области. После завершения расчетов во всех

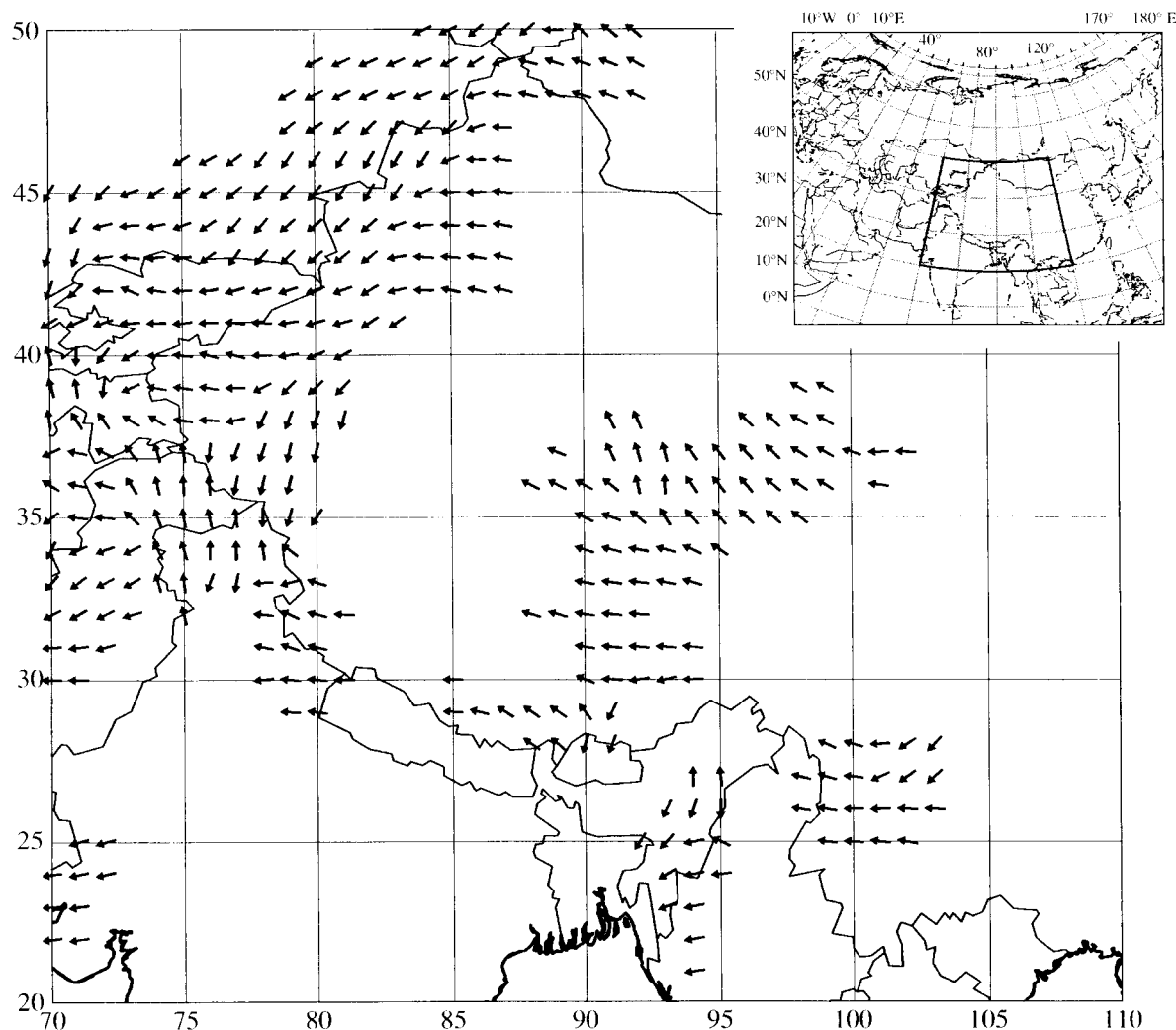


Рис. 3. Пространственное распределение осей растяжения тензора напряжений Китая по механизмам очагов землетрясений за период 1998–2004 для глубины $0 < H < 35$ км. На врезке показано положение исследуемого региона.

узлах, в конечном итоге, для исследуемого региона имеем дискретный набор точек с известными направлениями осей главных напряжений. Так как в общем случае координаты геометрического центра выборки не совпадают с координатами исходного узла сетки, то для сопоставления направлений этих осей с тензором скоростей деформаций (эти расчеты проведены с шагом 1° по широте и долготе) необходимо было привести полученные результаты к аналогичному виду. Эта задача была решена методом интерполяции поля направлений сейсмотектонических напряжений по соответствующей сетке. При переходе к сетке с шагом 1° для каждого узла по ближайшим к нему точкам вычислялся суммарный тензор напряжений, по которому определялись направления наибольшего относительного сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости (в дальнейшем называемые горизонтальными сжатием и растяжением).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе использован каталог механизмов очагов землетрясений с 1964 по 2005 годы, полученный в результате обработки информации о знаках первых вступлений по данным сейсмологического бюллетеня Международного Сейсмологического Центра (International Seismic Center, <http://www.isc.ac.uk>). При решении фокальных механизмов использовались методические подходы, предложенные в [Мострюков, Петров, 1994].

Необходимо отметить, что реконструкция поля напряжений для Китая ранее уже проводилась и основные результаты отражены в работах [Гущенко, 1979b; Петров и др., 2002; Petrov et al., 1994; Rebetsky et al., 1997].

Еще раз отметим, что в настоящей работе использованы результаты вычисления тензора скоростей деформаций по данным GPS, полученные в работе [Liang, Niu et al., 2003a] для территории

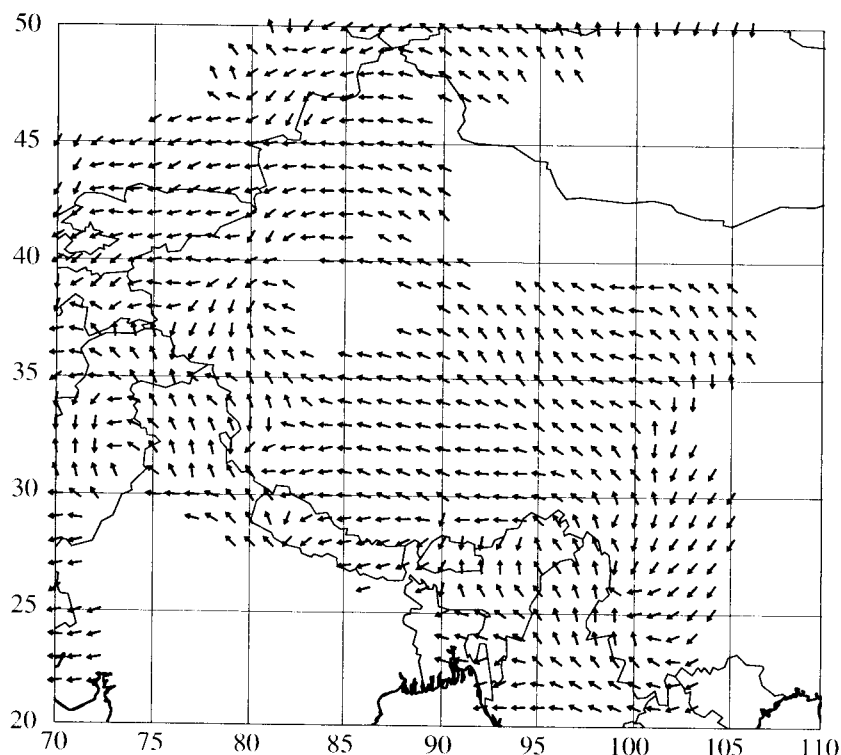


Рис. 4. Пространственное распределение осей растяжения тензора напряжений Китая по механизмам очагов землетрясений за период 1985–2004 для глубины $0 < H < 35$ км.

Китая. Расчеты тензора скоростей деформаций по GPS-измерениям в оригинале были сделаны для всей территории Китая. Но, как показал пространственный анализ имеющихся данных по механизмам очагов землетрясений и особенно последующие по ним реконструкции поля напряжений, для восточной части исследуемой территории не хватает сейсмологической информации. По этой причине все результаты реконструкции поля тектонических напряжений и все дальнейшие их сравнения с данными GPS представлены для сейсмоактивных областей Китая и прилегающих территорий в области с координатами 20° – 50° с.ш., 70° – 105° в.д. (врезка на рис. 3). Ввиду того, что оси относительного удлинения и укорочения тензора скоростей деформаций, полученные по GPS-измерениям, ортогональны, как и горизонтальные оси напряжений, рассчитанные по совокупностям механизмов очагов землетрясений, в дальнейшем на всех картах показаны только оси относительного удлинения и все сравнения проведены для их направлений.

На первом этапе исследований реконструкция поля тектонических напряжений проведена для такого же временного интервала, что и исходная информация по GPS-измерениям – 1998–2004 годы для интервала глубин $0 < H < 35$ км. Рисунок 3 иллюстрирует результаты этой реконструкции. Как видно из рис. 3, недостаточность сейсмологи-

ческой информации по механизмам очагов землетрясений за этот временной интервал не позволила получить необходимой в полной мере информации для сравнения с осями тензора скоростей деформаций.

Поэтому на втором этапе была выполнена реконструкция поля тектонических напряжений Китая по механизмам очагов землетрясений за период 1985–2004 для глубины $0 < H < 35$ км. На рис. 4 представлено пространственное распределение осей горизонтального растяжения сеймотектонических напряжений за этот период. Видно из рисунка, что количество полученной информации стало достаточным для проведения сравнения. Но возникает вопрос о правомерности изменения временного интервала и влияния его на результаты реконструкции. Другими словами – насколько стационарно поле напряжений при изменении расчетного интервала и возможно ли использование полученных результатов за другой временной интервал для сравнения с осями тензора скоростей деформаций. Для получения ответа на этот вопрос проведено сравнение результатов реконструкций поля тектонических напряжений, полученных для разных расчетных интервалов.

На рис. 5 представлено пространственное распределение осей растяжения за 1998–2004 годы и в изолиниях показана величина азимутального расхождения (в градусах) горизонтальных растя-

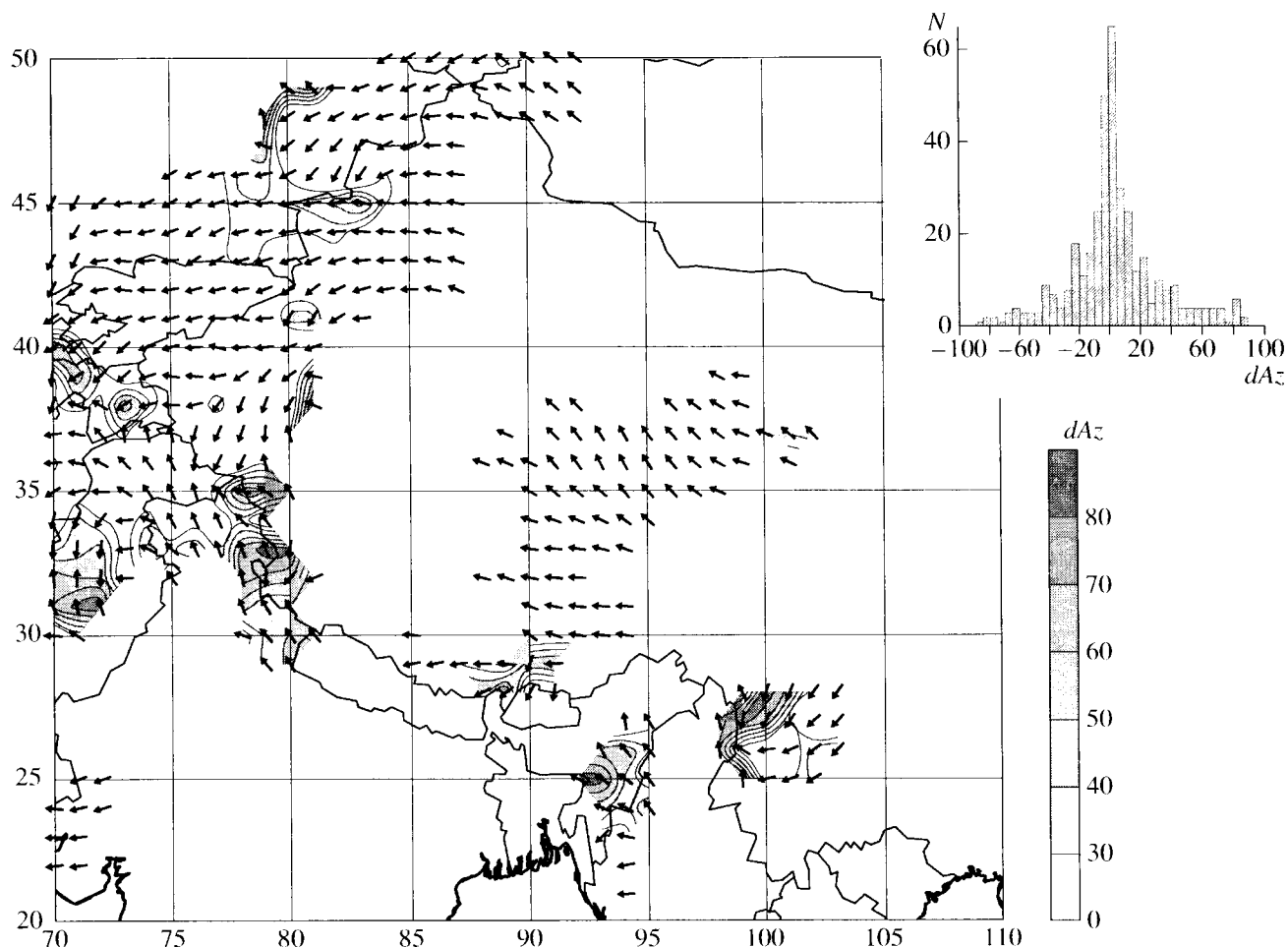


Рис. 5. Величина азимутального расогласования горизонтальных направлений сейсмотектонических деформаций за период 1998–2004 годы и за период 1985–2004 годы для глубины $0 < H < 35$ км (стрелками показана ориентация осей растяжения за период 1998–2004 годы). На врезке этого и последующих рисунков показана гистограмма распределения величины азимутального отклонения (в градусах) сравниваемых параметров.

жений сейсмотектонических деформаций за 1998–2004 годы и за 1985–2004 годы для глубины $0 < H < 35$ км. На врезке рисунка показана гистограмма распределения величины азимутального отклонения (в градусах) направлений осей максимального растяжения, полученных за разные периоды. Аналогичные гистограммы будут показаны и на последующих рисунках. Сравнение направлений осей растяжения по двум интервалам показало их хорошую сходимость, что подтверждается характером распределения их отклонений. Результаты сравнения позволили сделать вывод о стационарности поля напряжений (поле направлений осей) при расширении временного интервала. Наибольшие величины расогласования приурочены к областям с высоким пространственным градиентом направлений осей эллипсоида напряжений или к границам исследуемого региона, где исходные данные не всегда обеспечивают всестороннее окружение центра узла. Такой вывод позволяет все дальнейшие реконструкции поля напряжений

и последующие сравнения с осями тензора скоростей деформаций делать, правда, с большой осторожностью, для временного интервала 1985–2004 гг.

На рис. 6 представлено пространственное распределение осей растяжения за 1985–2004 гг. и в изолиниях показана величина азимутального расогласования осей растяжения сейсмотектонических деформаций за 1985–2004 годы и осей растяжения тензора скоростей деформаций, рассчитанных по данным GPS-измерений (за 1998–2004 годы) для глубины $0 < H < 35$ км. Сейсмотектонические деформации и GPS-измерения для большей части территории совпадают. Это говорит о том, что пластические деформации приповерхностной части земной коры, которые не учитываются сейсмотектонической деформацией, или малы, или имеют ту же направленность. Как видно из рисунка, наибольшие величины расогласования тензоров напряжений и деформаций приурочены к об-

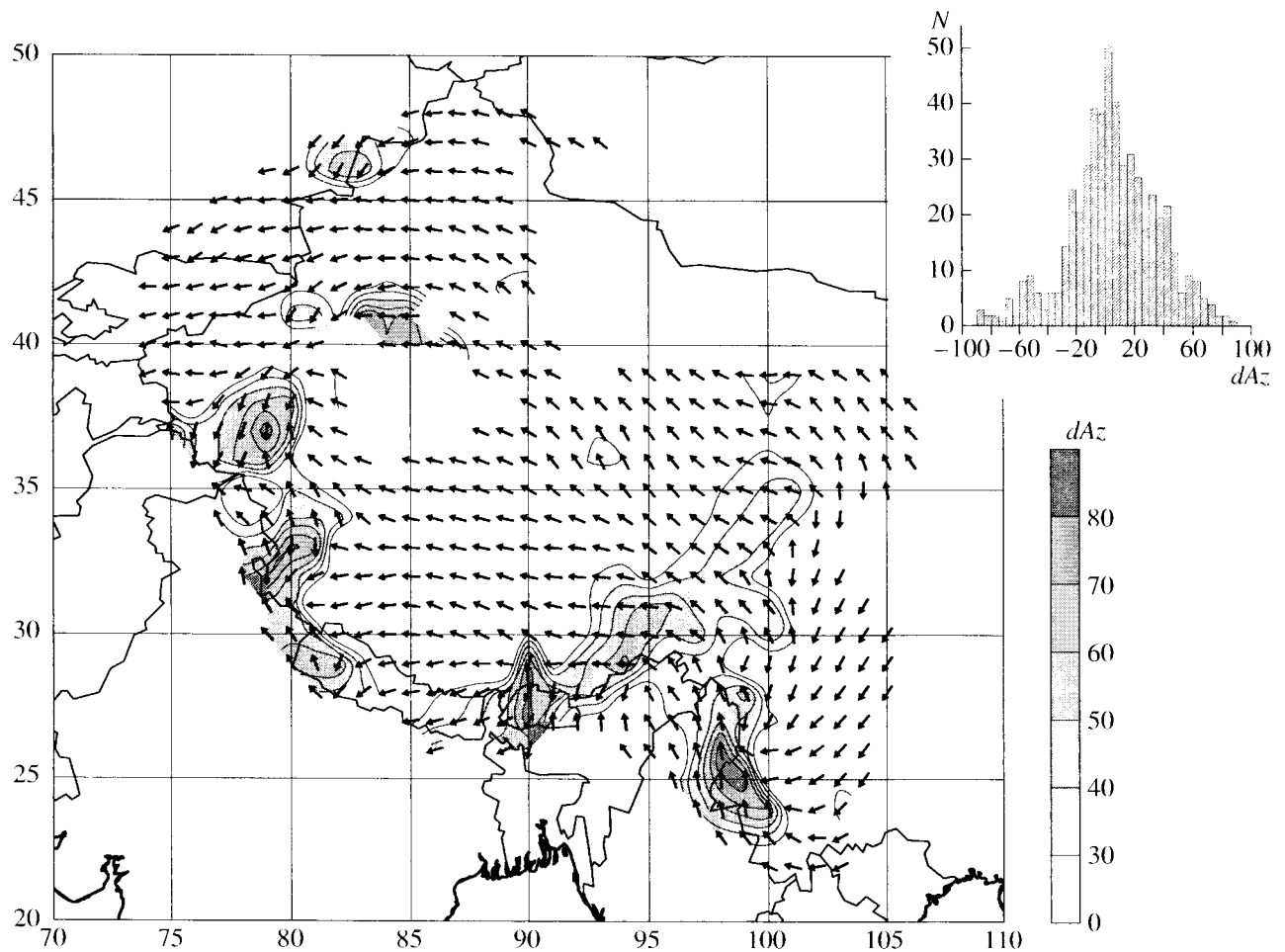


Рис. 6. Величина азимутального рассогласования горизонтальных направлений сеймотектонических деформаций за период 1985–2004 годы и деформаций, рассчитанных по данным GPS-измерений (за период 1998–2004 годы) для глубины $0 < H < 35$ км. Стрелками показана ориентация осей растяжения за период 1998–2004 годы.

ластям с высоким пространственным градиентом направлений осей деформаций и, возможно, связано с неоднородностью строения областей. С другой стороны, в некоторых областях исследуемого региона наибольшие величины рассогласования приурочены к местам, в недостаточной степени обеспеченным исходными данными по GPS-измерениям (смотри рис. 1), или с малым количеством землетрясений с известным механизмом очага. В этом случае расхождения могут быть связаны с погрешностью интерполяции данных. Также большие величины рассогласования могут быть приурочены к зонам с однотипными деформациями по обоим горизонтальным осям (сжатие или растяжение во всех направлениях) или областям с малыми абсолютными значениями современных горизонтальных движений. Выяснение природы рассогласования – задача последующих исследований.

Для выяснения вопроса об изменчивости параметров поля напряжений с глубиной было проведено сравнение осей растяжения, полученных за вре-

менной интервал 1985–2004 гг. для разных глубинных интервалов $0 < H < 35$ км и $35 < H < 70$ км. На рис. 7 представлено пространственное распределение осей растяжения за период 1985–2004 гг. для глубины $35 < H < 70$ км и в изолиниях показана величина азимутального рассогласования направлений сеймотектонических деформаций для глубин $0 < H < 35$ км и $35 < H < 70$ км. Как видно из врезки на рис. 7, дисперсия распределения азимутальных отклонений увеличилась. Большее рассогласование направлений осей сеймотектонических деформаций мы связываем с изменением напряженного состояния по глубине. Но неравномерность площадного распределения исходной информации на глубинах свыше 35 км не позволяет в полной мере отразить сходимость направлений осей главных напряжений по изучаемой площади. При этом большая часть исследуемой территории, исходя из результатов сравнения, относится к областям большого рассогласования направлений осей. Также выделяются области, где направле-

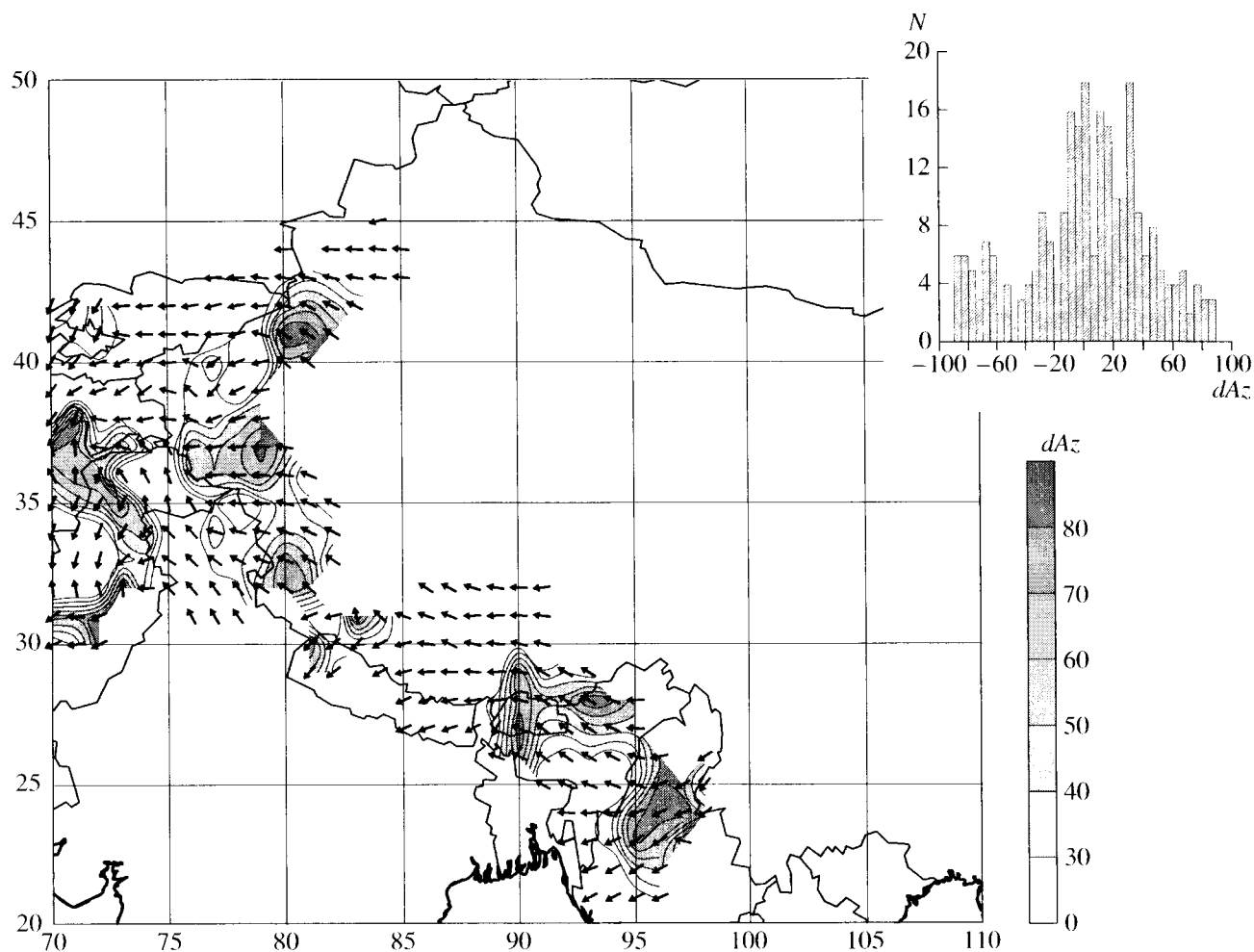


Рис. 7. Величина азимутального рассогласования горизонтальных направлений сеймотектонических деформаций за период 1985–2004 годы для глубин $0 < H < 35$ км и $35 < H < 70$ км. Стрелками показана ориентация осей растяжения для глубины $35 < H < 70$ км.

ния осей напряжений остаются неизменными, независимо от глубинной привязки исходных данных. Факт наличия в исследуемом регионе отдельных областей как со стационарным, так и с изменчивым по глубине полем напряжений указывает на разные особенности деформирования этих областей. Возможно, эти особенности отражают наличие в исследуемом регионе областей (блоков), геологическое строение которых имеет разную мощность по глубине, что может подтверждаться пространственным совпадением аномалий на рисунках 6 и 7.

ВЫВОДЫ

Реконструкции поля тектонических напряжений Китая по механизмам очагов землетрясений за периоды 1998–2004 и 1985–2004 для глубины $0 < H < 35$ км позволили сделать вывод о стационарности поля напряжений при расширении временного интервала.

Сравнение пространственного распределения осей растяжения сеймотектонических деформаций за 1985–2004 гг. и осей растяжения тензора скоростей деформаций, рассчитанных по данным GPS-измерений, позволило сделать следующие выводы:

1. Сеймотектонические деформации и GPS-измерения для большей части территории совпадают.
2. Пластические деформации приповерхностной части земной коры, которые не учитываются сеймотектонической деформацией, или малы, или имеют ту же направленность.
3. Наибольшие величины рассогласования тензоров напряжений и деформаций приурочены к областям с высоким пространственным градиентом направлений осей деформаций и, возможно, связаны с неоднородностью строения областей.
4. В некоторых областях исследуемого региона наибольшие величины рассогласования при-

урочены к местам в недостаточной степени обеспеченным исходными данными по GPS-измерениям или малым количеством землетрясений с известным механизмом очага. В этом случае расхождения могут быть связаны с погрешностью интерполяции данных.

5. Большие величины рассогласования могут быть приурочены к зонам с однотипными деформациями по обеим горизонтальным осям (сжатие или растяжение во всех направлениях) или областям с малыми абсолютными значениями современных горизонтальных движений.

Сравнение осей растяжения, полученных за один и тот же временной интервал для двух глубинных интервалов $0 < H < 35$ км и $35 < H < 70$ км позволило сделать следующие выводы:

1. Неравномерность площадного распределения исходной информации на глубинах свыше 35 км не позволяет в полной мере отразить сходимость направлений осей главных напряжений по изучаемой площади.

2. Большая часть исследуемой площади, исходя из результатов сравнения, относится к областям большого рассогласования направлений осей.

3. Выделяются области, где направления осей напряжений остаются неизменными, независимо от глубинной привязки исходных данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках российско-китайского проекта “Sino-Russia joint researches on the inner-continent seismo-tectonics and new techniques in earthquake observations and prediction”, при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 06-05-64548а, ОНЗ РАН (фундаментальная программа №6 “Геодинамика и механизм деформирования литосферы”), при финансовой поддержке грантов “Study on the new methods for possibility evaluation and earthquake prediction in China”, № 2004DFBA0005 и “China scholarship Council Fund”, № 2004419001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блочные структуры и кинематика восточной и центральной Азии по данным GPS // Геотектоника. 2005. № 5. С. 3–19.
- Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений. Поля напряжений и деформаций в литосфере / Под ред. А.С. Григорьева и Д.Н. Осокиной. М.: Наука. 1979а. С. 7–25.
- Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. Поля напряжений и деформаций в литосфере / Под ред. А.С. Григорьева и Д.Н. Осокиной. М.: Наука. 1979б. С. 26–51.
- Гущенко О.И. Определение тектонических полей напряжений методом кинематического анализа структур разрушения (в связи с прогнозом сейсмической опасности). Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. Апатиты, 1982. С. 36–51.
- Гущенко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А. Структура поля современных региональных напряжений сейсмоактивных областей земной коры восточной части Средиземноморского подвижного пояса // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312. № 4. С. 830–835.
- Зубович А.В., Бейсенбаев Р.Т., Ван Сяочан, Джан Юн-фен, Кузиков С.И., Моисеенко О.И., Нусипов Е.Н., Щелочков Г.Г., Щерба Ю.Г. Современная кинематика Тарим-Тянь-Шань-Алтайского региона Центральной Азии (по данным GPS-измерений) // Физика Земли. 2004. № 9. С. 31–40.
- Мострюков А.О., Петров В.А. Каталог механизмов очагов землетрясений, 1964–1990. Материалы мирового центра данных Б. М.: 1994. 87 с.
- Мухамедиев Ш.А. Реконструкция тектонических напряжений по разрывным сдвиговым смещениям: математические и физические ограничения // Докл. АН СССР. 1993. Т. 331. № 4. С. 500–503.
- Мухамедиев Ш.А., Белоусов Т.П., Галыбин А.Н. Теоретическое моделирование полей упругих палеонапряжений по данным натурных индикаторов // Физика Земли. 2005. № 11. С. 47–61.
- Мухамедиев Ш.А., Зубович А.В., Кузиков С.И. Выделение блоков земной коры по данным GPS-измерений // Докл. РАН. 2006. Т. 40. № 4. С. 539–542.
- Петров В.А., Мострюков А.О., Лыков В.И., Петрова Р.Н. Структура поля современных тектонических напряжений земной коры Китая и сопредельных сейсмоактивных регионов. Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В. Гзовского) / Под ред. В.Н. Страхова и Ю.Г. Леонова. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 272–281.
- Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Докл. РАН. 1999. Т. 365. № 3. С. 392–395.
- Ребецкий Ю.Л. Обзор методов реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций. Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В. Гзовского) / Под ред. В.Н. Страхова и Ю.Г. Леонова. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 227–243.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: ИКЦ Академкнига. 2007. 406 с.
- Chen Z., Burchfiel B.C., Liu Y., King R.W., Royden L.H., Tang W., Wang E., Zhao J., Zhang X. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation // Journal of Geophysical Research. 2000. V. 105. doi № B7. P. 16.215–16.227.

Gu G.H., Fu Y., Wang W.X. Analysis on the intensity of horizontal crustal deformation in China based on the results of GPS observations // *Earthquakes*. 2004. V. 24. № 2. P. 1–6.

Liang Z.S., Ma Z.J., Niu A.F., Zhang X.L., Wang S.X., Chen B. Approaches and preliminary results of crust movement researches based on the GPS in China // *Earth Science Frontiers*. 2003a. V. 10. № 1. P. 71–79.

Liang Z.S., Ma Z.J., Zhang X., Wang Q., Wang S.X. Horizontal strain field and tectonic deformation of China mainland related by preliminary result // *Chinese Journal of Geophysics*. 2003b. V. 46. № 3. P. 352–358.

Larson K.M., Burgman R., Bilham R., Freymueller J.T. Kinematics of the India-Eurasia collision zone from GPS measurements // *Journal of Geophysical Research*. 1999. V. 104. № B1. P. 1077–1093.

Ma Z.J., Chen X.L., Ye S.H., et al. Study on the recent crust movement based on GPS in China // *Science Sinica*. 2001. V. 46. № 13. P. 1118–1120.

Parsons T. Tectonic stressing in California modeled from GPS observations // *Journal of Geophysical Research*. 2006. V. 111. doi : 10.1029/2005JB003946. P. B03407.

Petrov V.A., Mostryukov A.O., Lykov V.I. The recent field of tectonic stresses over the territory of China // *Journal of earthquake prediction research*. 1994. V. 3. № 4. P. 509–527.

Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rosanova G.V., Fursova E.V. II. Stress-monitoring: The modern field of regional stresses in South-East Asia and Oceania. Principles of quasi-plastic deforming of fractured media // *Journal of earthquake prediction research*. 1997. V. 6. № 1. P. 11–36.

Ying S.F., Huang L.R., Guo L.Q. et al. The horizontal deformation observed by GPS in China // *Seismology and Geology*. 1999. V. 21. № 4. P. 459–464.

Сдано в набор 06.06.2008 г.

Подписано к печати 06.08.2008 г.

Формат бумаги 60 × 88¹/₈

Цифровая печать

Усл. печ. л. 14.0

Усл. кр.-отт. 3.1 тыс.

Уч.-изд. л. 13.9

Бум. л. 7.0

Тираж 213 экз.

Зак. 607

Учредители: Российская академия наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Издатель: Академиздатцентр "Наука", 117997 Москва, Профсоюзная, 90

Оригинал-макет подготовлен МАИК "Наука/Интерпериодика"

Отпечатано в ППП "Типография "Наука", 121099 Москва, Шубинский пер., 6