

УДК 550.34

## МЕХАНИЗМЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ В СИРИИ

© 2012 Х.М. Омар, Р.Э. Татевосян, Ю.Л. Ребецкий

*Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва, 12399;  
e-mail: ruben@ifz.ru*

Обработаны записи телеметрической сети сейсмических станций Сейсмологической службы Сирии. Составлен бюллетень, в который вошли 50 землетрясений, записанных более чем на 8 станциях за время с 03.01.2009 г. по 30.06.2011 г. Этот бюллетень использовался для определения механизмов очагов землетрясений и напряженного состояния земной коры в Сирии. Задачей исследования является оценка современного напряженного состояния земной коры в Сирии. Важным результатом работы является то, что в механизмах очагов слабых землетрясений доминирует кинематический тип (сброс), отличающийся от того, который проявляется в относительно сильных землетрясениях (сдвиг). При этом в слабых землетрясениях присутствуют и другие типы механизмов. Последнее обстоятельство обеспечивает большое разнообразие напряженного состояния отдельных участков земной коры региона.

*Ключевые слова: землетрясения, механизмы очагов, Сирия.*

### ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая активность Сирии, в первую очередь, связана с трансформным разломом Мертвого моря. Для восточного Средиземноморья Н. Амбрейзис и Дж. Джексон (Ambraseys, Jackson, 1998) собрали данные о 150 исторических землетрясениях связанных с этим разломом. М. Сбенати с соавторами (Sbeinati et al., 2005) для территории Сирии и соседних регионов составили каталог из 181 исторических землетрясений с 1365 г. до н.э. до 1900 г. н.э.

На современном этапе сейсмическая активность в пределах Сирии значительно снизилась; возникают лишь землетрясения небольших магнитуд (<5.5). Для регистрации современных землетрясений на ее территории создана сейсмометрическая телеметрическая сеть наблюдений из 26 станций. Задачей нашего исследования является оценка современного напряженного состояния земной коры в Сирии. Материалом для проведенных исследований послужили непрерывные сейсмические записи на всех станциях региональной сети в период с 03.01.2009 г. по 30.06.2011 г. В результате обработки всех записей были выделены 292 землетрясения.

### КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕКТОНИКИ СИРИИ

Согласно классификации (Девяткин и др., 2000) основными структурными единицами платформенной части Сирии являются:

1. Недеформированные участки платформы: поднятия Алеппо, Иорданское, Рутба, Рауда; впадина Эль-Араб (Эд-Друз). Они обособились в основном в мезозое.

2. Участки, подвергавшиеся воздействию альпийского и новейшего тектогенеза, который вызвал образование специфических структурных форм и формаций горных пород:

– краевые участки платформы (блок Бассит-Латакия и Курд-Даг), затронутые альпийскими деформациями. В них внутри чехла заключены аллохтонные массы вулканогенных и осадочных пород альпийского происхождения;

– зона Левантского разлома, представленная на территории Сирии системой рифтовых впадин и сопряженных с ними структур;

– зона Пальмерид, внутриплатформенная зона деформированного чехла.

3. Система передовых прогибов и впадин: впадины Месопотамского прогиба (в узком смысле) и Евфратская, а также ряд более мелких впадин (Северо-Евфратская, Южно-Синджарская,

Северо-Абдэльазизская, Северо-Синджарская), заполненные позднекайнозойской молассой повышенной мощности. Все они в совокупности, вместе с внутренними зонами валлообразных поднятий Синджар и Абд-эль-Азиз-Байда, относятся к системе передового позднеальпийского Месопотамского (в широком смысле) прогиба. Формирование перечисленных элементов происходило в одно и то же время, и геодинамически они связаны между собой. Наиболее отчетливо эти процессы проявляются в развитии рифтового пояса и Пальмерид. Остальная площадь за пределами перечисленных элементов относится к ненарушенному платформенному чехлу.

Первая версия карты сейсмического районирования в масштабе 1:1000000 была составлена в 2004 году (Rukieh et al., 2005). Это карта была исправлена позже (Трифонов и др., 2010). В ней показаны принципы и технология оценки сейсмической опасности на основе комплексного использования сейсмологических данных и геологических сведений – результатов изучения неотектоники и современной геодинамики региона.

### ИСХОДНЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Материалом для исследования послужили записи землетрясений, полученные на региональной сейсмической сети Сирии. Для того, чтобы избежать влияния грубых ошибок, были отобраны потенциально наиболее надежные

решения. Априорно к таковым отнесены землетрясения, зарегистрированные на 8 станциях и более. Всего этому критерию отбора удовлетворили 50 землетрясений.

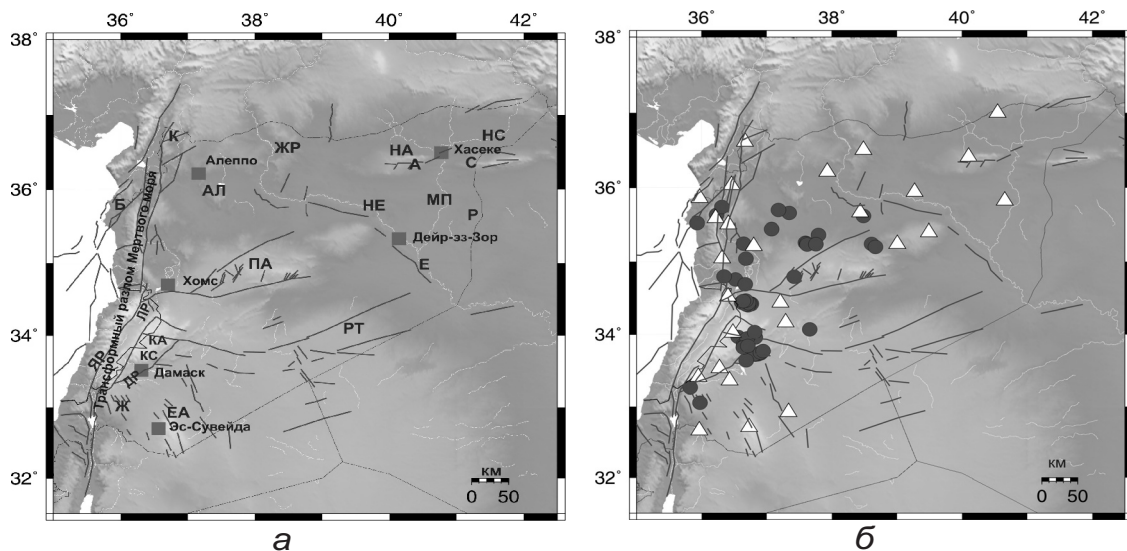
Сеть, состоящая из 26 узкополосных станций с датчиками типа SMG-40T-1, изготовленных швейцарской компанией GeoSIG, была разбита в конце 2006 г. по всей территории Сирии (рис. 1). Передача данных в сейсмологический центр, расположенный в Дамаске, осуществляется телеметрически.

Для расчета гипоцентров использовалась программа Hypocenter (Lienert, 1991; Lienert et al., 1986; Lienert, Havskov, 1995). Механизмы землетрясений определялись с помощью программы «FA», разработанной А.В. Ландером<sup>1</sup>. Карта эпицентров землетрясений из каталога механизмов представлена на рис. 1.

### СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ

Сейсмологическая служба Сирии использует в своих рутинных определениях скоростную модель, представленную в работе (Ibrahim et al., 2012). Эта модель использовалась нами

<sup>1</sup> Комплекс программ определения механизмов очагов землетрясений и их графического представления // Отчет: Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01.2003-31.12.2003). РАН, ГС, Камчатская ОМСП, г. Петропавловск-Камчатский, 2004 г. 396 с.



**Рис. 1.** Основные тектонические структурные единицы Сирии (а) согласно работе (Девяткин и др., 2000). Поднятия: АЛ – Алеппское, Ж – Иорданское, РТ – Рутба, Р – Рауда, ЖР – Джераблос, А – Абд-эль-Азиз-Байда, С – Синджар, ПА – Пальмериды, КС – Кассюн, КА – Каламун. Впадины: Е – Евфратская, ЕА – Эль-Араб, НЕ – Северо-Евфратская, НА – Северо-Абдэльазизская, НС – Северо-Синджарская. Блоки: Б – Бассит-Латакия, К – Курд-Даг, МП – Месопотамского прогиба. Показаны зона трансформных разломов Мертвого моря, ЛР – зона левантского разлома и разломы: ДР – Дамасский, ЯР – Яммуна. Квадраты – главные города Сирии. Карта расположения станций (треугольники) и эпицентров 50 землетрясений (круги), записанных на 8 станциях и более (б): тонкие линии – государственные границы; толстые линии – разломы по данным (Трифонов и др., 2010).

## МЕХАНИЗМЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ В СИРИИ

в качестве одной из тестируемых. Однако лучшую сходимость результата обеспечила альтернативная скоростная модель, полученная в ИФЗ РАН с помощью пакета программ SEISAN (Navskov, Ottomoller, 2008). С помощью этого пакета возможно задавать практически неограниченное количество скоростных моделей. Для каждой модели определяются координаты гипоцентра всех 50 землетрясений. Наряду с этим определяется и средняя невязка (RMS) по всем 50 решениям. Был осуществлен перебор нескольких тысяч моделей. В качестве альтернативной выбрана модель, обеспечившая минимальное значение средней невязки (0.595). В альтернативной модели, представленной в табл. 1, показаны величины пластовых скоростей в слое, отношение  $V_p/V_s$  одинаково во всех слоях и равно 1.73.

Таблица 1. Альтернативная скоростная модель.

N	$V_p$ (км/сек)	$V_s$ (км/сек)	Глубина (км)
1	5.40	3.12	0
2	5.50	3.18	6
3	6.00	3.47	11
4	6.40	3.70	19
5	8.00	4.62	39

### МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Механизмы очагов землетрясений были разделены на три типа (табл. 2) в соответствии

с классификацией (Anderson, 1951; Simpson, 1997).

Таблица 2. Тип механизма очага землетрясения на основании углов погружения главных осей напряжения.

	Сдвиги	Взбросы	Сбросы
Углы погружения оси сжатия (от горизонта)	$< 45^\circ$	$\leq 45^\circ$	$\geq 45^\circ$
Углы погружения оси растяжения (от горизонта)	$< 45^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\leq 45^\circ$

Согласно принятой типизации получено 26 сбросов (52% от общего числа событий), 18 взбросов (36%) и 6 сдвигов (12%) (рис. 2а, 2б).

По данным Гарвардской сейсмологической обсерватории (Global..., 2012) самые сильные землетрясения на территории Сирии в течение последних двадцати лет произошли на северо-востоке Пальмерид 20/11/1994 14:31:04  $M_w = 5.3$ , на юго-востоке Пальмерид 24/12/1996 22:16:32 с  $M_w = 5.5$  и на юго-западе Латакии 29/03/2006 22:05:18 с  $M_w = 5.0$ , тип их механизма – сдвиг (рис. 2а, 2б).

Мы провели собственные определения механизмов очагов. На рис. 3 показан пример решения с помощью программы «ФА» – определение механизма очага двух землетрясений по знакам вступления волны Р. Результатом расчета программы являются данные о простирании, падении, двух нодальных плоскостей и направления подвижки вдоль них.

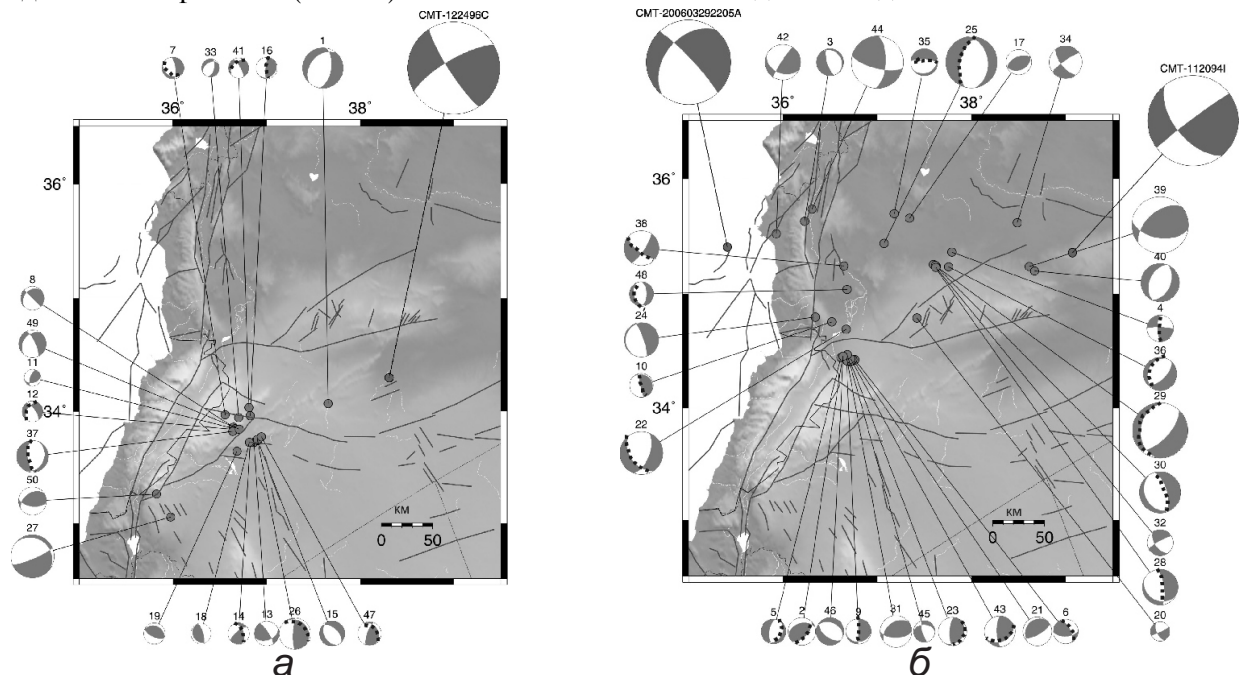


Рис. 2. Карты механизмов очагов землетрясений Сирии (светлый квадрант – сжатие) по записям местной сети сейсмических станций и по данным Гарвардского университета (СМТ). Разделение на две карты а и б сделано для удобства представления данных о механизмах очагов землетрясений. Жирная прерывная дуга – реализованная нодальная плоскость согласно алгоритма МКА.

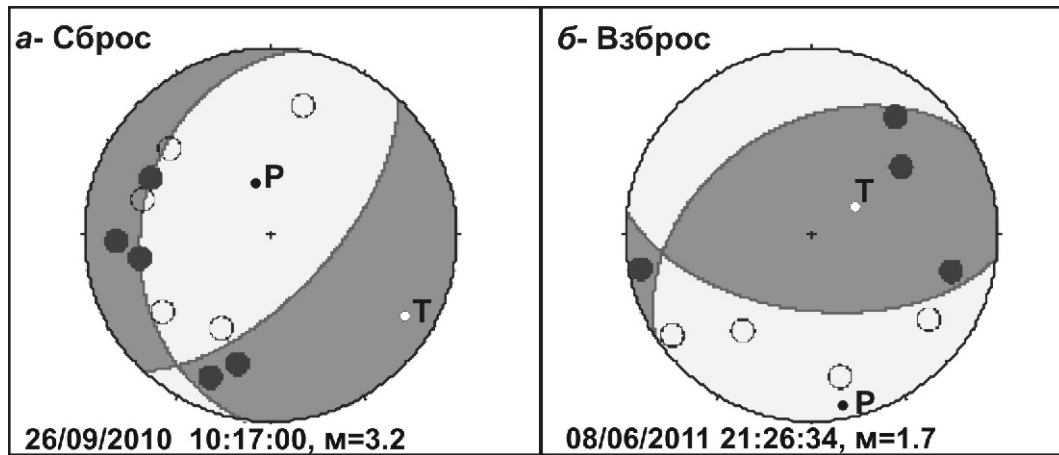


Рис. 3. Пример определения механизмов по знакам первых вступлений продольной волны для двух землетрясений. Светлые кружки – знаки минус, темные кружки – знаки плюс, Т и Р – главные оси растяжения и сжатия.

Видно, что для первого определения (рис. 3а) механизм очага отвечает сбросу, положение обеих нодальных плоскостей достаточно надежно подкреплено знаками. Для второго определения (рис. 3б) механизм очага отвечает взбросу и его плоскости также определены надежно.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Реконструкция напряжений в Сирии осуществлялась с использованием автоматизированной программы STRESS\_seism, которая реализует алгоритм метода катакластического анализа (МКА) разрывных смещений (Ребецкий, 2007). В настоящей статье представлены результаты тектонофизической реконструкции напряжений, выполненные на основании данных о 50 механизмах очагов землетрясений. В основе МКА лежат положения теории пластичности, требующие уменьшения внутренней упругой энергии при реализации каждого разрыва и достижения максимума диссипации этой энергии на совокупности разрывных смещений (землетрясений) для истинного (искомого) тензора напряжений.

МКА состоит из четырех этапов, позволяя оценивать не только ориентацию его главных осей (Ребецкий, 1999, 2001), но и величины напряжений (Ребецкий, 2003, 2005, 2007, 2009а, 2009б). В данной работе были реализованы только два первых этапа метода и получены данные об эллипсоиде напряжений и приращений сейсмостектонических деформаций (Костров, 1974), а также об относительных величинах эффективного давления и максимального касательного напряжения.

Исследуемый регион относится к сейсмоактивным районам, имеющим как распределенную (фоновую) сейсмичность, так и участки

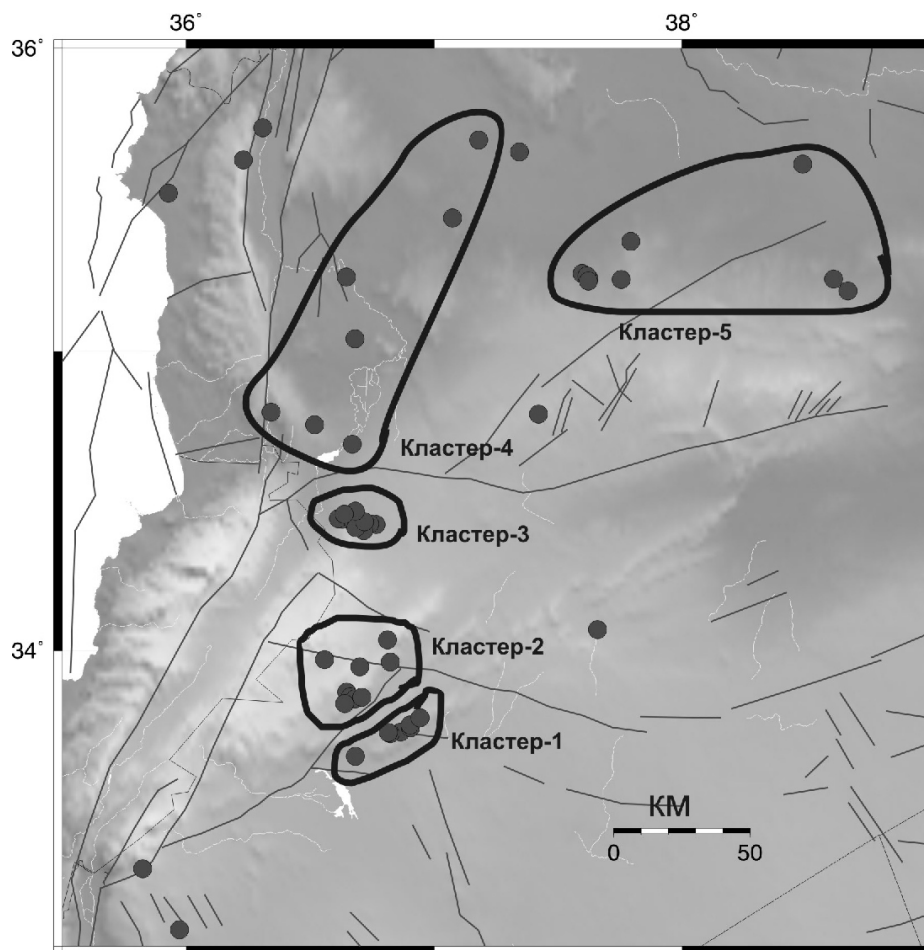
локального ее повышения. При этом плотность эпицентров фоновой сейсмичности, которой отвечали землетрясения, расположенные на расстояниях более 10-30 км (рис. 2), была недостаточна для определения напряженного состояния с использованием алгоритмов МКА. Обращало также на себя внимание существование близко расположенных кластеров с достаточно сильно отличающимися механизмами очагов землетрясений.

Было сделано несколько пробных реконструкций напряжений в автоматическом режиме создания однородных выборок землетрясений, предусмотренном в используемом программном комплексе STRESS\_seism.

С целью избежать возникающих в процессе расчетов проблем мы выполнили реконструкцию в исследуемом районе в принудительном режиме создания начальной выборки механизмов очагов землетрясений. В этом случае роль программы состояла в проверке событий из этих начальных выборок на совместимость согласно алгоритму метода катакластического анализа и определению по созданным однородным выборкам землетрясений параметров тензора напряжений. Несмотря на эту процедуру, нам приходилось в некоторых случаях понижать минимальное допустимое число землетрясений в однородной выборке до 5 (стандартно в МКА принимается 6 событий) как минимум для однородной выборки землетрясений.

Нами было выделено пять условных кластеров разных по площади и количеству событий. На рис. 4 показано расположение этих кластеров.

В кластере № 1 преимущественно представлены механизмы взрезного типа, когда одна из нодальных плоскостей субвертикальная, а другая пологая. Здесь также есть механизмы очагов сбросового типа. Общее число событий в



**Рис. 4.** Зоны пяти кластеров землетрясений, выделенных для принудительного создания начальных выборок механизмов очагов землетрясений.

данном кластере – 7. В процессе проверки на совместимость механизмов очагов землетрясений из начальной выборки два из них с магнитудами 1.4 и 1.8 не были включены в однородную выборку (рис. 5а). Один из этих механизмов был взрезового типа с расположением секторов сжатия и растяжения, противоположным трем другим взрезовым механизмам, включенным в однородную выборку. Другой из отвергнутых механизмов землетрясения также был близок к взрезовому, но имел простирание нодальных плоскостей, резко отличающееся от других подобных механизмов.

На основании пяти землетрясений из однородной выборки программа STRESS\_seism по алгоритму первого этапа метода МКА рассчитала параметры тензора напряжений, отвечающие их механизмам. Как показано на рисунке (рис. 5а) напряженное состояние этого кластера близко к горизонтальному сжатию при простирании оси и максимального девиаторного сжатия  $\sigma_3$  ( $60^\circ$ ) на северо-восток. Тип тензора напряжений, характеризующийся значениями коэффициента Лодена-Надаи, представляет собой комбинацию чистого сдвига и одноосного растяжения ( $\mu_\sigma \approx -0.36$ ).

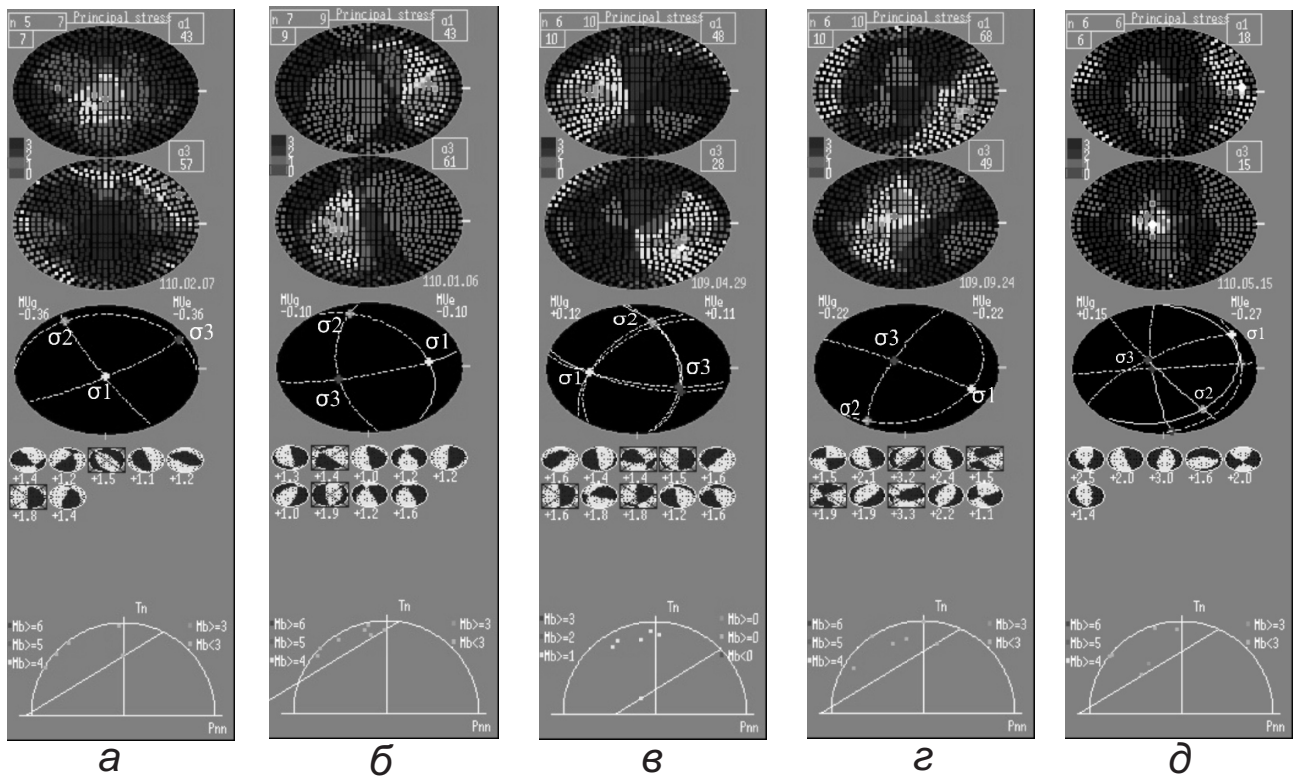
После определения ориентации осей главных напряжений и значений коэффициента Лодена-Надаи программа STRESS\_seism по алгоритму второго этапа МКА приступает к определению относительных величин напряжений, используя для этого диаграмму Мора. Для построения этих точек достаточно данных о параметрах тензора напряжений, полученных после первого этапа реконструкции, но требуется осуществить выбор одной из нодальных плоскостей в качестве реализованной в виде разрыва. В МКА предусмотрена процедура выбора такой плоскости на основе сравнения значений кулоновых напряжений (Ребецкий, 2003, 2005, 2007, 2009а, 2009б) на каждой из нодальных плоскостей.

Для пяти событий из однородной выборки первого кластера была произведена процедура идентификации реализованной плоскости. После определения реализованной плоскости появляется возможность нанести на редуцированную диаграмму Мора точки, характеризующие нормальные и касательные напряжения в очаге каждого из землетрясений в однородной выборке. Как показано на нижней части рис. 5а, четыре из этих точек для первого кластера

расположены компактно вблизи большого круга Мора. Определенные по их положению значения редуцированного эффективного давления  $p^*/\tau_f$  равно 3.6, а максимального касательного напряжения  $\tau/\tau_f$  равно 2.6 ( $\tau_f$  – внутреннее сцепление). В настоящей работе не выполнялась оценка внутреннего сцепления ( $\tau_f$ ) массивов горных пород, так как это делалось, например, в работах (Ребецкий, 2009а, 2009б; Ребецкий и др., 2008; Ребецкий, Маринин, 2006). Для подобных расчетов требуются данные о динамических параметрах очагов землетрясений, которые для землетрясений Сирии еще не рассчитывались. Поэтому мы не можем указать абсолютный уровень  $p^*$  и  $\tau$ . Однако, если допустить, что  $\tau_f \approx 80$  бар (такое значение внутреннего сцепления было получено для массивов Алтая и Саян (Ребецкий и др., 2008)), то значения  $p^*$  и  $\tau$  будут соответственно: 288 бар и 208 бар.

В кластере номер 2 преимущественно представлены механизмы взрезового и сбросового типов (всего 9 событий). Из них семь прошли проверку на совместимость механизмов очагов землетрясений (рис. 5б). Как следует из

рисунка геодинамический режим, отвечающий этому кластеру, близок к вертикальному сдвигу (перекашиванию в вертикальной плоскости) с субгоризонтальной ориентацией оси промежуточного главного напряжения и достаточно крутым погружением осей двух других главных напряжений. В данном случае ось  $\sigma_3$  погружена на запад ( $55^\circ$ ), а  $\sigma_1$  на восток ( $27^\circ$ ). Значение коэффициента Лоде-Надаи  $\mu_\sigma \approx -0.1$ , что отвечает виду тензора напряжений близкому к чистому сдвигу. На рис. 2 показаны плоскости для механизмов этого кластера, выделенные алгоритмом МКА как реализованные. Как показано на нижней части рис. 5б, на диаграмме Мора точки для второго кластера также расположены более компактно на диаграмме Мора, чем точки первого кластера. Такое их расположение с одной стороны показывает меньшую вариабильность нодальных плоскостей для механизмов из однородной выборки. С другой стороны это говорит о более высоком уровне эффективного давления и дифференциальных напряжений исследуемого участка коры (Ребецкий, 2007; Byerlee, 1978).



**Рис. 5.** Окно результатов расчета программы STRESS\_seism для каждого кластера: а – (кластер-1); б – (кластер-2); в – (кластер-3); г – (кластер-4); д – (кластер-5). В верхней части рисунка изображены две нижние единичные полусферы, на которых производится определение положения главных осей напряжений путем суммирования квадрантов сжатия и растяжения механизмов из однородной выборки землетрясений. На расположенной под ними нижней полусфере показаны выходы главных осей напряжений (сжатие –  $\sigma_3$ , растяжение –  $\sigma_1$ , промежуточные –  $\sigma_2$ ). Далее расположены механизмы из начальной выборки землетрясений (зачеркнуты механизмы, не вошедшие в однородную выборку). Под ними показана редуцированная диаграмма Мора (верхняя половина), где в полукруге единичного радиуса изображены точки, определяющие соотношения редуцированных нормальных и касательных напряжений (наклонная линия – минимальное сопротивление трения с нулевым сцеплением).

В данном случае  $p^*/\tau_f = 6.2$ , а  $\tau/\tau_f = 4.0$ , что выше значений для первого кластера.

Третий кластер содержит десять землетрясений с механизмами типа взрывов, сбросов со сдвигами и взбросов со сдвигами. Они пространственно близки друг к другу и поэтому объединены в одну начальную выборку. Из этих десяти событий только шесть можно объединить в однородную выборку (рис. 5в). Результаты анализа однородной выборки дают ориентацию осей максимального сжатия с погружением на юг-восток и погружением на юго-запад осей девиаторного растяжения.

Четвертый и пятый кластеры имеют по шесть и десять событий (рис. 5г, 5д) в начальной выборке соответственно и результаты реконструкции для них дают близкие ориентации осей максимального сжатия  $\sigma_3$  на северо-запад при крутом их погружении ( $71^\circ$ - $73^\circ$ ). В этих определениях несколько отличаются ориентации осей главного напряжения  $\sigma_1$  (ось девиаторного растяжения). Для четвертого кластера они полого погружены ( $14^\circ$ ) на восток – северо-восток, а для пятого также полого ( $16^\circ$ ) на восток – юго-восток. В четвертом кластере было шесть событий в начальной выборке и все прошли проверку на критерии однородности МКА. В пятом кластере из десяти событий в однородной выборке шесть составили начальную.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Землетрясения в основном отмечены на западе Сирии, где расположен крупнейший разлом Мертвого моря. Последние двадцать лет самые сильные землетрясения на территории Сирии произошли на северо-востоке Пальмерид 20/11/1994 14:31:04  $M_w = 5.3$ , на юго-востоке Пальмерид 24/12/1996 22:16:32 с  $M_w = 5.5$  и юго-западе Латакии 29/03/2006 22:05:18 с  $M_w = 5.0$ , тип их механизма – сдвиг.

По данным о 50 землетрясениях получено 26 сбросов (52% от общего числа событий), 18 взбросов (36%) и 6 сдвигов (12%). Таким образом, важнейшим результатом работы является то, что в механизмах очагов слабых землетрясений доминирует кинематический тип (сброс), отличающийся от того, который проявляется в относительно сильных землетрясениях (сдвиг). При этом в слабых землетрясениях присутствуют и другие типы механизмов. Последнее обстоятельство обеспечивает большое разнообразие напряженного состояния отдельных участков земной коры региона.

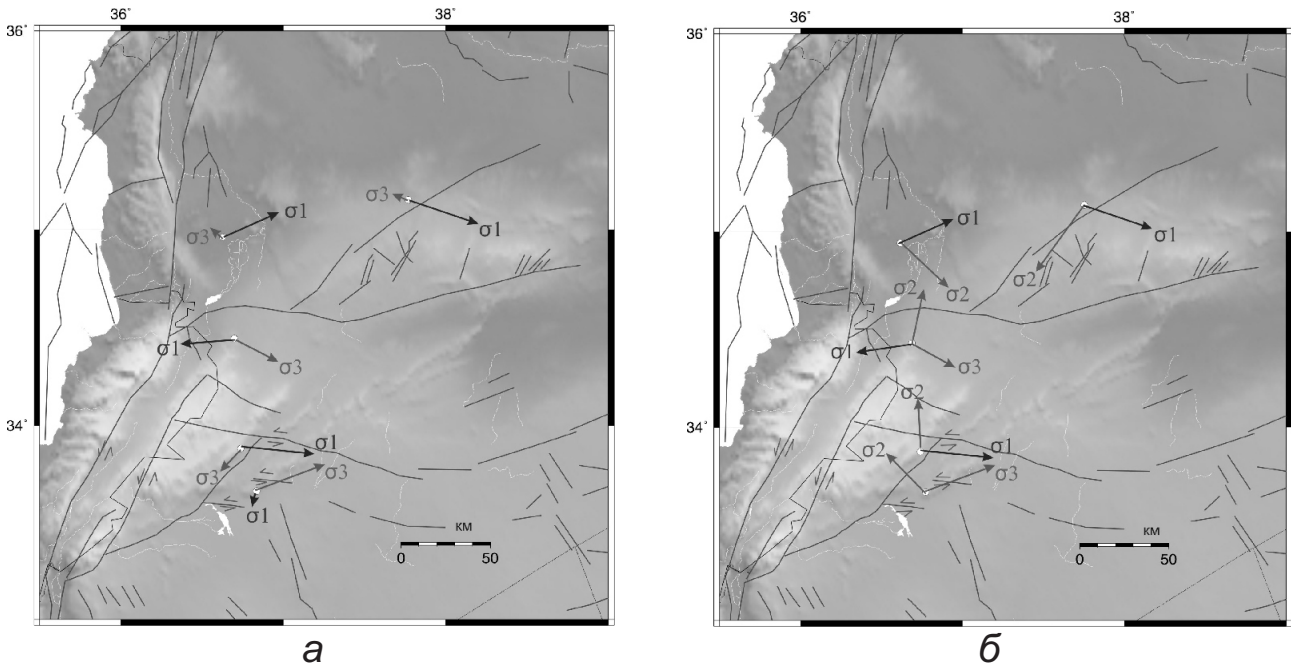
В совокупности результаты реконструкции пяти кластеров определяют поле напряжений для западной и северной частей Сирии. Землетрясения первых двух кластеров расположены

в коре юго-восточного обрамления горного поднятия Кассюн. Результаты реконструкции для этих кластеров показывают резкую смену напряженного состояния в коре при переходе через разлом Дамаск с восточного борта на западный. Если для северо-западного борта погружение осей максимального сжатия крутое ( $55^\circ$ ) на юго-запад, то для восточной ось этого напряжения полого погружена на восток – северо-восток. Третий кластер, находящийся в коре северного склона другого поднятия Каламун дает третье направление действия осей максимального сжатия – погружение на юго-восток.

Следует заметить, что в области первых двух кластеров землетрясений в коре существует большое число разломов разного ранга. На рис. 6 показаны наиболее крупные из них. На более детальных картах, например в работе (Трифонов и др., 2010), плотность разрывных структур еще больше. При этом в этих разрывах выделяются две основные системы, которые в упрощенной схеме рис. 6 присутствуют. Это левые сдвиги с восток – юго-восточным простиранием и крупный региональный разлом с взбросовой компонентой при наличии и сдвиговой. Согласно схеме рис. 6 полученные данные о характере ориентации главных осей напряжений первых двух кластеров согласуются с кинематикой разрывов этой области. При этом промежуточное главное напряжение в этой зоне субгоризонтально (рис. 6б), что играет важную роль в определении сдвиговой составляющей разрывов, т.к. либо ось максимального сжатия (второй кластер), либо ось минимального сжатия (первый кластер) ориентированы субвертикально.

Напряженное состояние для северного обрамления горного поднятия Пальмерид имеет субвертикальную ориентацию осей максимального сжатия по данным четвертого и пятого кластеров. Область эпицентров землетрясений этого кластера характеризуется существенно меньшей раздробленностью. На карте (Трифонов и др., 2010) здесь нет крупных разрывов. С другой стороны здесь пониженный рельеф в сравнении с расположенным к югу горным поднятием Пальмерид.

Для интерпретации полученного для этой зоны распределения ориентации главных осей напряжений мы использовали результаты реконструкции напряжений, выполненной для орогенов Центральной Азии в работах (Ребецкий и др., 2008). Здесь для Алтая-Саян и Северного Тянь-Шаня в участках крупных поднятий в большом числе случаев была получена субгоризонтальная ориентация осей наибольшего сжатия, а в рядом расположенных крупных прогибах субгоризонтально, как правило, ориентирована ось максимального девиаторного растяжения. Подобная



**Рис. 6.** Ориентация осей главных напряжений  $\sigma_3$  (максимальное сжатие),  $\sigma_2$  (промежуточные),  $\sigma_1$  (минимальное сжатие или девиаторное растяжение): *a* – оси двух главных напряжений  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$ ; *б* – оси двух главных напряжений с пологим погружением (исключение третий кластер).

закономерность как раз и наблюдается нами для коры северной части Сирии, соседствующей с горным поднятием Пальмерид. Отметим, что полученные данные о напряженном состоянии этого участка согласуются с результатами исследований палеонапряжений (Zanchi et al., 2002), выполнено по изучению трещиноватости структурными методами.

### ВЫВОДЫ

В механизмах очагов слабых землетрясений доминирует кинематический тип (сброс), отличающийся от того, который проявляется в относительно сильных землетрясениях (сдвиг). При этом в слабых землетрясениях присутствуют и другие типы механизмов.

Результаты реконструкции для первого и второго кластеров показывают резкую смену напряженного состояния в коре при переходе через Дамаский разлом с восточного борта на западный. Если для северо-западного борта погружение осей максимального сжатия крутое ( $55^\circ$ ) на юго-запад, то для восточного ось этого напряжения полого погружена на восток – северо-восток.

К северу от поднятия Каламун (третий кластер) направление действия осей максимального сжатия погружается на юго-восток.

Напряженное состояние для северного обрамления горного поднятия Пальмерид (четвертый и пятый кластеры) имеет субвертикальную ориентацию осей максимального сжатия.

Уровень напряжений, связанный со значениями редуцированных параметров  $p^*/\tau_f$  и  $\tau/\tau_f$ , является наибольшим для второго кластера (наименьший разброс точек на диаграмме Мора), и наименьший для третьего кластера (разброс точек на диаграмме Мора наибольший). Для трех других кластеров уровень напряжений находится между напряжениями этих двух кластеров.

Авторы выражают благодарность А.В. Ландеру за помощь в определении механизмов очагов на основе разработанной им программы. Так же авторы признательны В.Г. Трифонову за информацию о тектонике Сирии. Мы признательны Сирийскому сейсмологическому центру за предоставление записей региональной сети. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 11-05-00361-а).

### Список литературы

- Девяткин Е.В., Додонов А.Е., Добрава М.Р. и др. Очерки геологии Сирии (Тр. ГИН РАН; Вып. 526). М.: Наука, 2000. 204 с.
- Костров Б.В. Сейсмический момент, энергия землетрясений и сейсмическое течение горных масс // Изв. АН СССР. Физика земли. 1974. № 1. С. 23-40.
- Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // ДАН. 1999. Т. 365. № 3. С. 392-395.



- Ребецкий Ю.Л.* Принципы мониторинга напряжений и метод катакластического анализа совокупностей сколов // БМОИП. Сер. геол. 2001. Т. 76. Вып. 4. С. 28-35.
- Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // ДАН. 2003. Т. 3. № 2. С. 237-241.
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. С. 39-54.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка величин напряжений в методе катакластического анализа разрывов // ДАН. 2009а. Т. 428. № 3. С. 397-402.
- Ребецкий Ю.Л.* Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов // Геофизический журнал. 2009б. Т. 31. № 2. С. 93-106.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В.* Напряженное состояние и деформации земной коры Алфе-сааянской складчатой области перед Чуйским (Алтайским) землетрясением 2003 года // Проблемы тектонофизики к сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 245-299.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006. Т. 47. № 11. С. 1192-1206.
- Трифонов В.Г., Бачманов Д.М., Иванова Т.П. и др.* Принципы и технология использования геологических данных для оценки сейсмической опасности (на примере Сирии) // Инженерные изыскания. 2010. № 4. С. 44-51.
- Ambraseys N.N., Jackson J.A.* Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean // *Geophys. Jour. Intern.* 1998. V. 133. № 2. P. 390-406.
- Anderson E.M.* The dynamics of faulting // *Trans. Edinburgh. Geol.* 1951. Sec (8). P. 387-402.
- Byerlee J.D.* Friction of Rocks // *Pure and applied geophysics.* 1978. V. 116. №. 4-5. P. 615-626.
- Global CMT catalogue (2012) <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- Havskov J., Ottomoller L.* (Editors) SEISAN: The earthquake analysis software. Version 8.2. 2008. 259 p.
- Ibrahim R., Takenaka H., Daoud M. et al.* 1-D Velocity model for Syria from local Earthquake Data and new seismicity map in Syria // *Bulletin of IISEE.* 2012. v. 46, p. 121-137.
- Lienert B.R.E.* Report on modifications made to Hypocenter. Technical report. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway, 1991. P. 15.
- Lienert B.R.E., Berg E., Frazer L.N.* Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 1986. V. 67. № 3. P. 771-783.
- Lienert B.R.E., Havskov J.* A computer program for locating earthquakes both locally and globally // *Seismological Research Letters.* 1995. V. 66. № 5. P. 26-36.
- Rukieh M., Trifonov V.G., Dodonov A.E. et al.* Neotectonic Map of Syria and some aspects of Late Cenozoic evolution of the north-western boundary zone of the Arabian plate // *Journal of Geodynamics.* 2005. V. 40. № 2-3. P. 235-256.
- Sbeinati M.R., Darawcheh R., Mouty M.* The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D. // *Annals of Geophysics.* 2005. V. 48. № 3. P. 347-435.
- Simpson R.W.* Quantifying Anderson's fault types // *JGR.* 1997. V. 102. № B8. P. 17909-17919.
- Zanchi A., Battista G., Darkal A.N.* Paleostress analyses in NW Syria: constrains on the Cenozoic evolution of the northwestern margin of the Arabian plate // *Tectonophysics.* 2002. V. 357. № 1. P. 255-278.

ОМАР и др.

## **EARTHQUAKE MECHANISMS AND STRESS-STATE IN THE EARTH CRUST IN SYRIA**

**Kh. M. Omar, R.E. Tatevossian, Yu.L. Rebetskiy**

*Shmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow 123995*

Seismic records from a telemetric network of Syrian Seismological Survey were processed. The authors compiled an earthquake bulletin, which includes data on 50 earthquakes recorded at least by 8 stations over the period 03.01.2009 – 30.06.2011. The bulletin was used to determine earthquake source mechanisms and stress-state in Syria. The goal was to evaluate the modern stress-state in the earth crust in Syria. The remarkable result is that the type of mechanism dominating for small earthquakes (normal faulting) is different from that one, which occurs in larger events (strike-slip). At the same time smaller earthquakes demonstrate more diversity in source mechanisms. The later also reflects a great variety of the stress-state in different crust domains in the region.

*Keywords: earthquakes, source mechanisms, Syria.*