

УДК 550.34

МОДЕЛЬ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 7 СЕНТЯБРЯ 2009 г. НА ЦЕНТРАЛЬНОМ КАВКАЗЕ

© 2011 г. С.С. Арефьев, В.В. Быкова, Р.Н. Вакарчук

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

7 сентября 2009 г. на южном склоне Большого Кавказского хребта в очаговой зоне известного Рачинского землетрясения 1991 г., подробно изученного благодаря своевременному проведению масштабных полевых эпицентральных наблюдений, произошло землетрясение с $M_w=6.0$. Оперативно организованные полевые эпицентральные наблюдения в этом случае не позволили детально исследовать структуру очаговой зоны вследствие своей ограниченности.

Моделирование очага землетрясения было выполнено методом инверсии объемных волн на базе данных мировой сети сейсмологических наблюдений (проект *IRIS*) с использованием программы *MT5*.

Согласно полученным результатам, очаг землетрясения 7 сентября 2009 г. вполне удовлетворительно описывается простым источником типа “двойной диполь”. Наилучшее соответствие расчетных сейсмограмм наблюдаемым получено для трех субочагов при расчетах полного тензора сейсмического момента. Однако при этих расчетах изотропная компонента тензора оказывается аномально большой, что заставляет с осторожностью относиться к результатам проведенных исследований.

Ключевые слова: афтершок, очаг землетрясения, инверсия волновых форм, сейсмограмма.

Введение

7 сентября 2009 г. на южном склоне Большого Кавказского хребта в северо-восточной части Грузии произошло землетрясение с магнитудой $M_w=6.0$ (*СМТ*). Подземные толчки ощущались в ряде регионов юга России, Южной Осетии, некоторых городах Армении (Гюмри, Ванадзор, Алаверди). Оперативно проведенные сеймотектонические исследования и инструментальные полевые наблюдения носили ограниченный характер. Временная сеть из пяти сейсмических станций, развернутая Институтом физики Земли РАН, вела непрерывную запись сейсмических событий в период с 14 сентября по 5 октября 2009 г. Станциям сети удалось зарегистрировать 111 афтершоков, хотя афтершоковая активность затухала довольно быстро.

Рассматриваемое в данной статье событие произошло непосредственно в очаговой области Рачинского землетрясения 1991 г. ($M_w=7.0$), сильнейшего за все время проведения в регионе инструментальных наблюдений, которое охватило южный склон Большого Кавказа на севере Грузии. Важная особенность Рачинского землетрясения – обилие афтершоков с высокими значениями магнитуды, среди которых выделяются два: первый с $M_w=6.1$, зафиксированный 29 апреля вскоре после основного толчка, и второй с $M_w=6.2$, произошедший 15 июня в 00 ч 59 мин.

Основной толчок Рачинского землетрясения и афтершоки первого года исследованы довольно детально (см., например, [Fuenzalida et al., 1997; Арефьев, 2003]). До основного толчка 1991 г. эта область не проявляла себя сколь-либо сильными землетрясениями. Однако после Рачинского землетрясения в течение вот уже почти 20 лет уровень сейсмической активности остается в ней на весьма высоком уровне. Подтверждением этого служит и произошедшее 7 сентября 2009 г. землетрясение с магнитудой $M_w=6.0$, которое сопровождалось достаточно хорошо выраженной афтершоковой последовательностью [Рогожин и др., 2009]. Такое поведение очаговой облас-

ти в течение длительного периода времени и довольно сильное землетрясение 7 сентября 2009 г. делают актуальным более детальное рассмотрение как самого недавнего землетрясения, так и всей зоны в целом.

Вопрос влияния сильнейшего для региона землетрясения на оценку долговременной сейсмической опасности важен не только с точки зрения фундаментальной науки, он имеет и ясный прикладной интерес. Тем не менее, как нам представляется, этот вопрос до сих пор не рассматривался. Если названное влияние имеет место, то сразу возникает задача выделения (идентификации) подобных ситуаций, в связи с чем представляется весьма перспективным детальное изучение очагов сильных землетрясений в исследуемой зоне с привлечением современных методов.

Цель настоящей работы – изучение очага землетрясения 7 сентября 2009 г. на Центральном Кавказе. Отметим, что это землетрясение нельзя отнести к числу очень сильных; поэтому трудно ожидать результатов, которые существенно отличались бы от решения *СМТ*. К сожалению, распределение эпицентров зарегистрированных афтершоков не дает возможности провести детальный анализ структуры, что объясняется ограниченностью сети – станций было не так много, располагались они в стороне от очаговой зоны. Тем не менее, представляется полезным проведение анализа записей этого землетрясения, полученных на мировой сети сейсмических станций, и моделирование его очага методом инверсии объемных волн. Особенно интересным это становится, если учесть, что рассматриваемое землетрясение произошло в том же районе, что и сильнейшее Рачинское ($M_w = 7.0$) [Арефьев, 2003]), которое сопровождалось интенсивным роением афтершоков, включавшим два с магнитудой $M_w > 6.0$.

Предшествующая сейсмичность района очага землетрясения

Кавказский регион, в пределах которого находится очаговая зона Рачинского землетрясения 1991 и очаг исследуемого землетрясения 2009 г. (рис. 1), лежит в области коллизионного взаимодействия Аравийской и Евразийской литосферных плит и Турецкой и Иранской субплит. Аравийская плита смещается на север со скоростью около 3 см в год, а Турецкая и Иранская субплиты выдавливаются на запад и восток соответственно. Малый Кавказ “проталкивается” на север, образуя дугообразную структуру, включающую восточную часть Черного моря и юг Каспия.

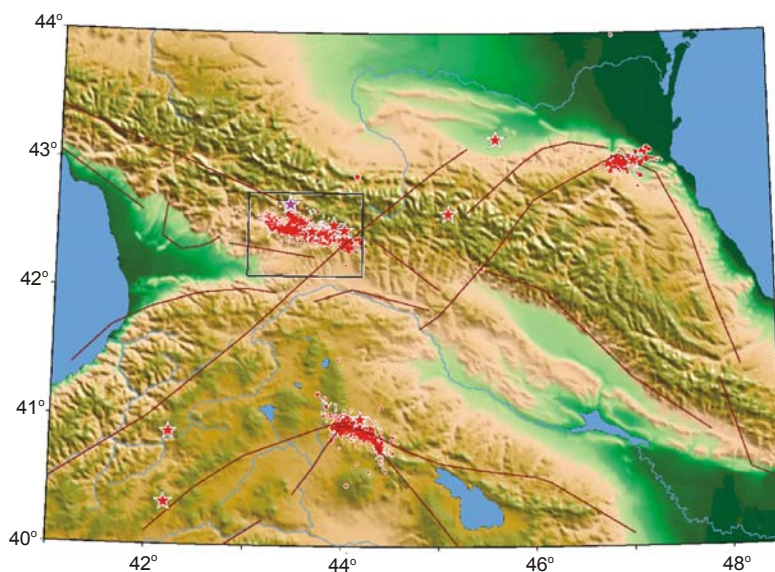


Рис. 1. Положение района исследований на карте рельефа Кавказского региона. Черный прямоугольник оконтуривает очаговую зону Рачинского землетрясения 1991 г.; звездочки – эпицентры сильных землетрясений с $M > 6.0$, произошедших после 1970 г.; кружки – эпицентры афтершоков Дагестанского, Спитакского и Рачинского землетрясений; коричневые линии – основные разломы региона

Очаговая зона Рачинского землетрясения расположена в районе с весьма невысокой предшествующей сейсмичностью, что отмечалось и ранее, например, в [Арефьев, 2003]. Относительно сильные ($M > 4.8$) землетрясения по каталогу Северной Евразии непосредственно в ее пределах неизвестны. Однако сейсмичность района резко возросла сразу после главного толчка 1991 г. и в течение уже почти двух десятилетий остается на высоком уровне, что подтверждается и землетрясением 2009 г. Это ясно видно при сопоставлении карт эпицентров, построенных по каталогу Северной Евразии для двух временных интервалов – 1900–1988 гг. (рис. 2, вверху) и 1900–2009 гг. (рис. 2, внизу). На обеих картах эпицентры всех землетрясений из каталога обозначены кружками разного диаметра; звездочки на нижней карте – эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, произошедшие после 1991 г. Черный прямоугольник оконтуривает очаговую зону Рачинского землетрясения.

Напрашивается вывод, что сильное землетрясение, близкое по энергии к максимально возможному, произошедшее в районе, который до этого многие годы не рассматривался как высокоактивный, существенно меняет сеймотектоническую обстановку в нем и надолго повышает общий уровень сейсмичности.

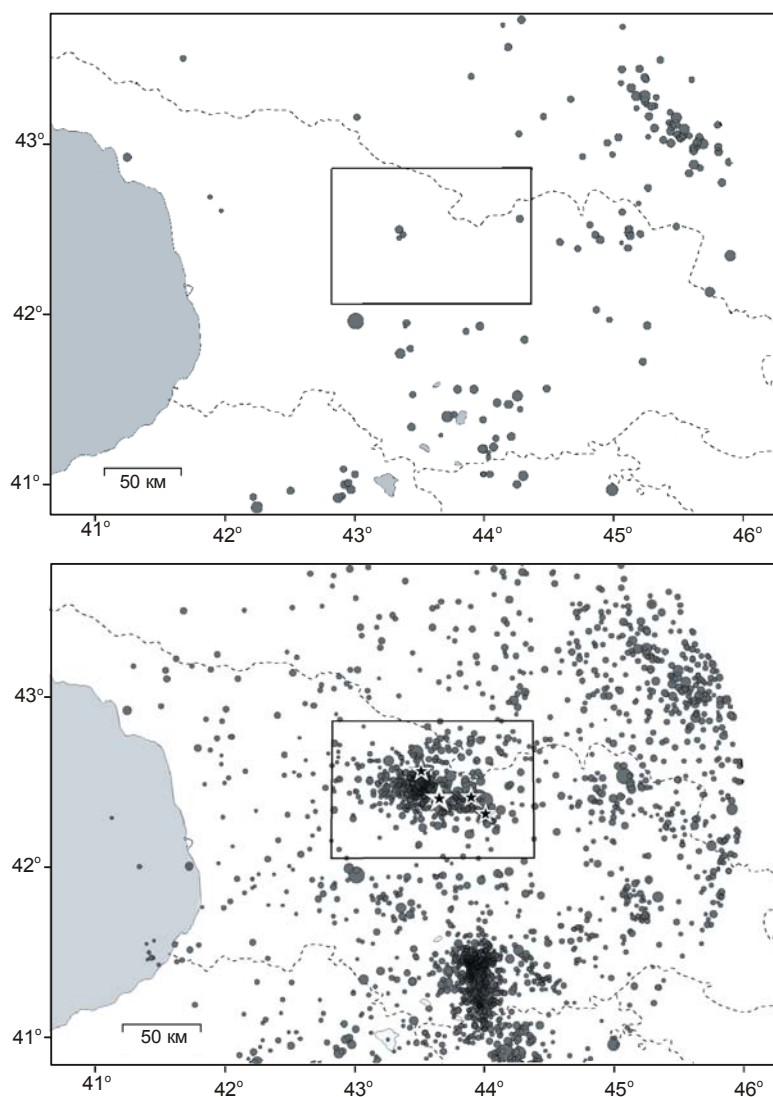


Рис. 2. Карта эпицентров по каталогу Северной Евразии за 1900–1988 гг. (вверху) и 1900–2009 гг. (внизу). Описание условных обозначений см. в тексте

Афтершоки, зарегистрированные сейсмостанциями временной сети

Известно, что положения эпицентров землетрясений, определяемые различными агентствами, обычно отличаются друг от друга. Это относится и к определениям положения эпицентра 7 сентября 2009 г., что хорошо видно на рис. 3, где показано положение эпицентра по данным *USGS* [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>] (зеленая звездочка), по данным сети наблюдений Грузии (синяя звездочка) и по определениям ГС РАН (красная звездочка). На том же рисунке представлены эпицентры афтершоков 2009 г. (наши данные – квадратики, данные, собранные *ISC* – малиновые кружки), а также главного толчка и сильнейших афтершоков 1991 г. (желто-малиновые кружки). Треугольниками отмечено положение сейсмостанций временной сети, по цифровым записям которых были рассчитаны гипоцентры с использованием той же скоростной модели, что и при эпицентральных наблюдениях 1991 г.

Как уже отмечалось, полевые эпицентральные наблюдения в зоне очага землетрясения 7 сентября 2009 г. носили ограниченный характер, что объясняет одностороннее расположение развернутой временной сети. Принимая во внимание эту особенность сети, можно утверждать, что афтершоковая область землетрясения 2009 г. почти совпадает с северной ветвью облака афтершоков Рачинского землетрясения 1991 г. Однако проследить тонкую структуру облака афтершоков землетрясения 2009 г. не удалось, хотя это было бы весьма полезным для моделирования очага.

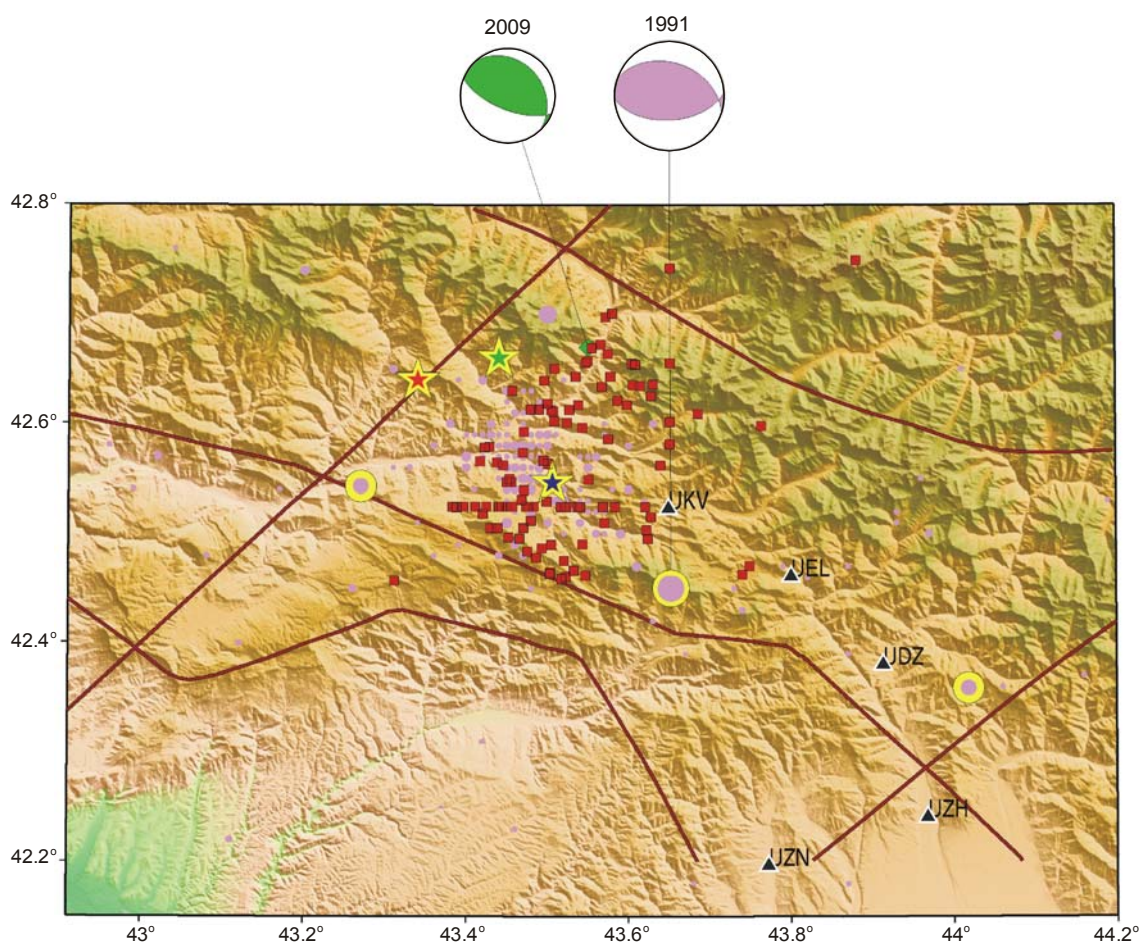


Рис. 3. Карта эпицентров афтершоков землетрясения 2009 г. Коричневые линии – основные разломы региона. Описание других условных обозначений см. в тексте. Над картой – механизмы Рачинского землетрясения (1991) и землетрясения 7 сентября 2009 г. (2009)

Сбор и подготовка исходных данных для моделирования

Построение модели очага осуществлялось методом инверсии волновых форм с использованием программы *MT5* [Zwick, McCaffrey, Abers, 1994]. Эта программа позволяет уточнить такие параметры очага, как тензор сейсмического момента, параметры ориентации сейсмического разрыва в очаге, глубину гипоцентра, форму временной функции источника и величину сейсмического момента. Программа рассчитывает синтетические сейсмограммы для текущей модели очага, сравнивает их с наблюдаемыми волновыми формами и рассчитывает поправки к модели с тем, чтобы приблизить синтетические сейсмограммы к наблюдаемым. Вследствие нелинейности соотношений между амплитудами волновых форм и параметрами модели этот процесс является итеративным.

Программа может работать в двух режимах: расчет полного тензора сейсмического момента и расчет параметров для модели двойного диполя. Во втором режиме механизм разрыва в очаге землетрясения описывается только девиаторными компонентами тензора сейсмического момента. В режиме расчета полного тензора (первый режим) изотропная компонента, соответствующая расширению или сжатию в очаговой области, может быть отлична от нуля.

В общем случае обнаружение изотропной компоненты является маловероятным на фоне шума, вносимого в волновые формы неоднородностями в строении Земли, только если в модель не включаются трехмерная скоростная структура и эффекты анизотропии и множественных отражений. Поскольку в программе используется одномерный скоростной разрез среды, значительная амплитуда изотропной компоненты (более нескольких процентов) может быть обусловлена неоднородностями в земной коре и (или) ошибками в определении скоростной модели, при выравнивании сейсмограмм или их оцифровке.

Кроме того, программа позволяет рассчитывать волновые формы для множественных событий с различными временами, параметрами очагов и положениями гипоцентров.

Для выполнения инверсии очага землетрясения методом расчета модели для точечного источника, описываемого тензором сейсмического момента (так называемый метод инверсии объемных волн), необходимо иметь достаточно качественные широкополосные записи землетрясения на станциях мировой сети (в первую очередь, на станциях проекта *IRIS*). Решение обратной задачи заключается в итеративном сравнении наблюдаемых и расчетных волновых форм до получения их наилучшего совпадения (основные параметры модели при этом меняются).

Отбор волновых форм (цифровых сейсмограмм) проходил по следующим критериям.

1. Станция, на которой получена запись события, должна находиться на расстоянии 30–90 градусов от эпицентра (требование метода).
2. На волновой форме должны уверенно выделяться четкие группы продольных и поперечных волн.
3. Записи (одна или несколько), которые существенно отличаются по амплитуде и форме колебаний от группы других, зарегистрированных на близкорасположенных станциях, должны исключаться из рассмотрения.

Сейсмограммы получались по сети *Internet* при помощи *web*-приложения *WILBER II* (<http://www.iris.edu/dms/wilber.htm>). Полученный файл включал собственно сейсмические записи, характеристики сейсмических каналов, координаты и названия станций, а также информацию о событии (координаты, время, магнитуда). С помощью специальной программы “*rdseed*” (разработка *IRIS*), предназначенной для распаковки

содержимого файла в формате *seed*, извлекались сами записи в формате *SAC*, частотные характеристики приборов, а также файлы, содержащие в себе информацию о режиме работы регистрирующего прибора во времени. Для чтения и обработки файлов данных в формате *SAC* использовалась одноименная программа.

Следующий этап подготовки заключался в приведении волновых форм к стандартным характеристикам. Для этого был составлен специальный инициализирующий сценарий, позволяющий в автоматизированном режиме осуществлять просмотр и отбор волновых форм, а также вырезать соответствующие участки групп волн. Кроме того, этот сценарий осуществлял приведение волновых форм к единой характеристике прибора для исключения влияния различной регистрирующей аппаратуры. В качестве стандартной характеристики, к которой приводились все записи, была выбрана характеристика с двумя нулями и двумя полюсами, имеющими на комплексной плоскости следующие координаты: нули $-0, 0$; полюсы $-0.2226+0.226i$ и $0.2226+0.226i$.

Необходимо упомянуть также весьма полезную программу *TauP*, которая входит в пакет *SAC* и служит для определения времени вступления *P*- и *S*-волн по заданным таблицам времен пробега, например, Джеффриса–Буллена. Поскольку разность вступления объемных волн в дальней зоне составляет несколько минут, программа *TauP* автоматизирует процесс отбора и вырезания, позволяя не просматривать всю запись (~20 мин) и определять вступления вручную.

Заключительный этап подготовки данных осуществлялся в программе *MT5int* (входит в пакет *MT5* [Zwick, McCaffrey, Abers, 1994]), выполняющей преобразование горизонтальных компонент записей *S*-волн из географической системы координат в систему координат источник-станция, т.е. в радиальную и тангенциальную компоненты. Данные по группе *S*-волн со станций, для которых не было записей обеих горизонтальных компонент, отбрасывались. В дальнейшем, в соответствии с требованиями методики, использовалась только тангенциальная компонента.

При подготовке сейсмограмм приходилось решать и разные локальные задачи. Например, на записях со станций, размещенных в Южной Африке, которые весьма важны с точки зрения равномерного окружения очага, была обнаружена одна и та же частота ~0.16 Гц, соответствующая максимуму спектра океанических микросейсм. Эта частота была нами отфильтрована подавляющим фильтром Батерворта. Результат для одной из станций (станция *LBTB*) приведен на рис. 4. Изменение фазы сигнала из-за применения фильтра не существенно, так как методика решения обратной задачи позволяет перемещать сейсмограмму во времени.

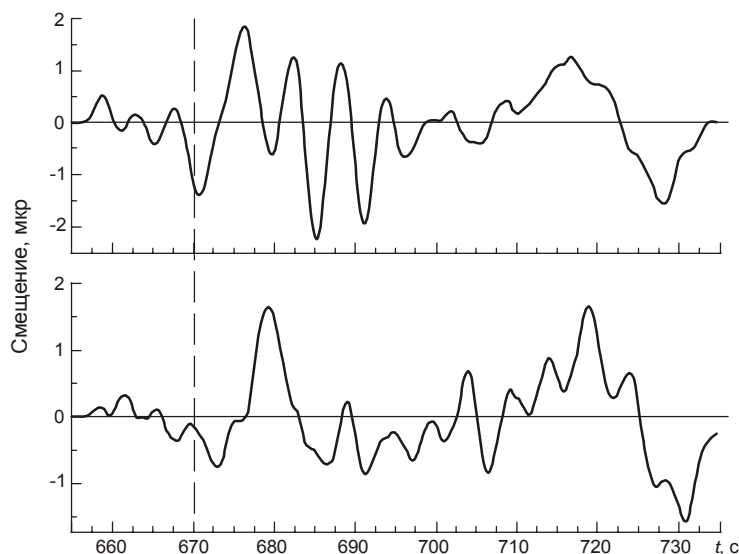


Рис. 4. Пример применения подавляющего фильтра Батерворта. Станции *LBTB*, Ботсвана. Вверху – исходная сейсмограмма; внизу – та же сейсмограмма после фильтрации

В результате для расчетов были отобраны записи 29 станций, зарегистрировавших вертикальные компоненты, и 52 станций, зафиксировавших горизонтальные компоненты; первые содержат вступления P -волн, вторые – SH -волн. Всего были использованы 29 сейсмограмм, содержащих вступление P -волны, и 26 – SH -волны. В процессе расчетов отбраковка станций продолжалась; окончательный список сейсмостанций, по записям которых проводилась инверсия, с указанием их кодов и координат представлен в табл. 1 (см. в конце статьи).

Моделирование очага

Азимутальное окружение очага землетрясения 7 сентября 2009 г. на Центральном Кавказе станциями было неоднородным (рис. 5). Так, на островах в Тихом океане имеется лишь небольшое число станций, которые к тому же обычно отбраковываются из-за шума; ни одна из станций к юго-востоку от очага (Индийский океан) не удовлетворяла условиям отбора. Поэтому при инверсии использовался прием установления весов станций в зависимости от плотности азимутального покрытия.

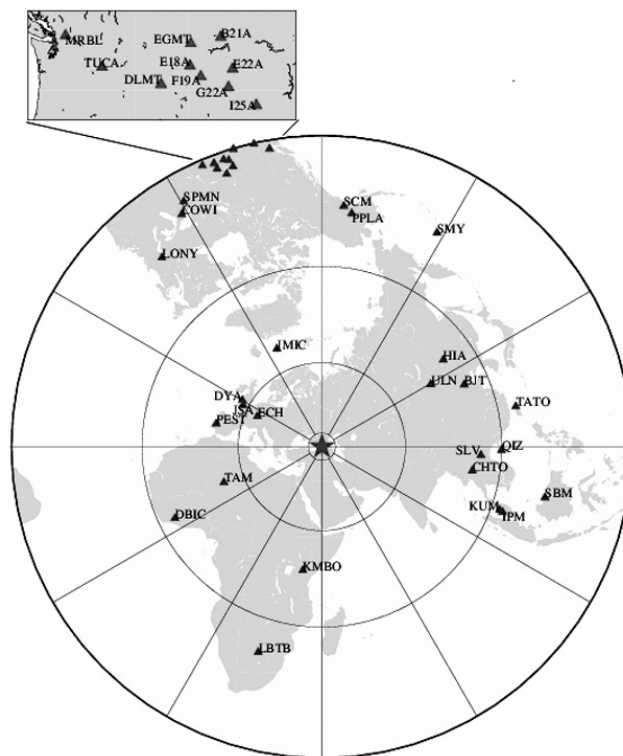


Рис. 5. Схема азимутального окружения станциями мировой сети очага землетрясения 7 сентября 2009 г. на Центральном Кавказе. Звездочка в центре – очаг землетрясения; треугольники – отобранные для анализа станции мировой сети с указанием их кодов (см. табл. 1). Врезка вверху – фрагмент схемы в более крупном масштабе

Подбор параметров очага осуществлялся путем минимизации с учетом весов суммы квадратов невязок между наблюдаемыми и расчетными сейсмограммами. Моделировались следующие параметры: механизм очага, скалярный сейсмический момент (при расчетах полного тензора, включая и изотропную компоненту), временная функция источника STF (*source time function*), относительное расположение субочагов в пространстве и время задержки для каждого субочага. При расчетах для модели двойного диполя параметрами механизма очага были простирание, падение, подвижка (*strike, dip, rake*); при расчетах полного тензора – шесть компонент тензора сейсмического момента.

На первом этапе моделирования, результаты которого приведены на рис. 6, очаг рассматривался как простой точечный источник без субочагов. Функция источника STF представлялась непрерывной в заданном промежутке времени совокупностью

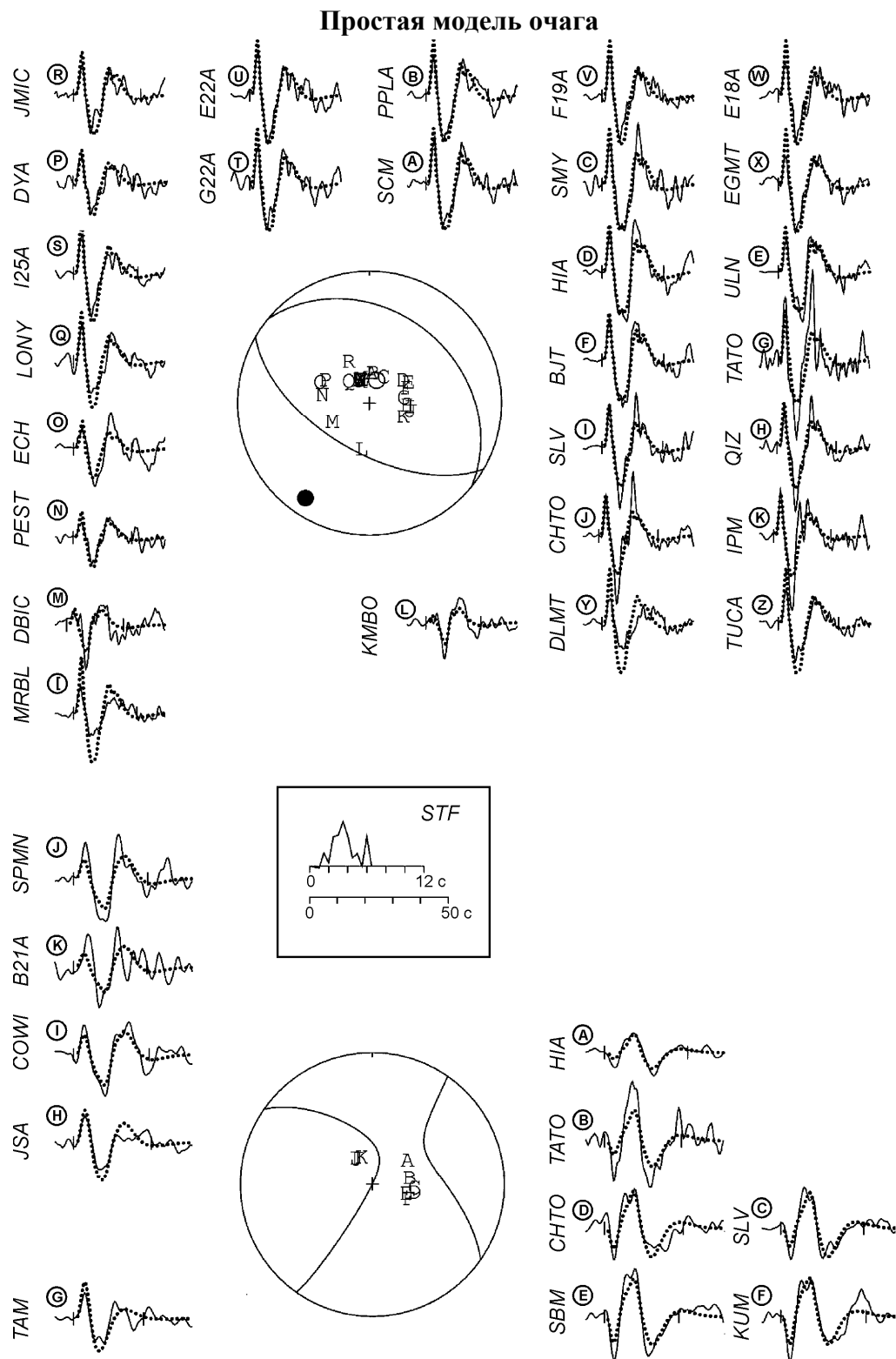


Рис. 6. Результаты инверсии для простой модели очага по *P*-волнам (вверху) и *SH*-волнам (внизу) с соответствующими нодальными плоскостями на фокальных сферах. На фокальных сферах: кружки с заливкой – оси сжатия; без заливки – оси растяжения; латинские буквы – положения станций на нижней полусфере. Волновые формы: сплошные линии – наблюдаемые сейсмограммы, пунктир – расчетные; вертикальные метки – границы участка, для которого проводилась инверсия; латинские буквы слева – коды станций (см. табл. 1), буквы в кружках соответствуют буквам на фокальных сферах. В рамке по центру – график временной функции очага, под ним ось времени для волновых форм

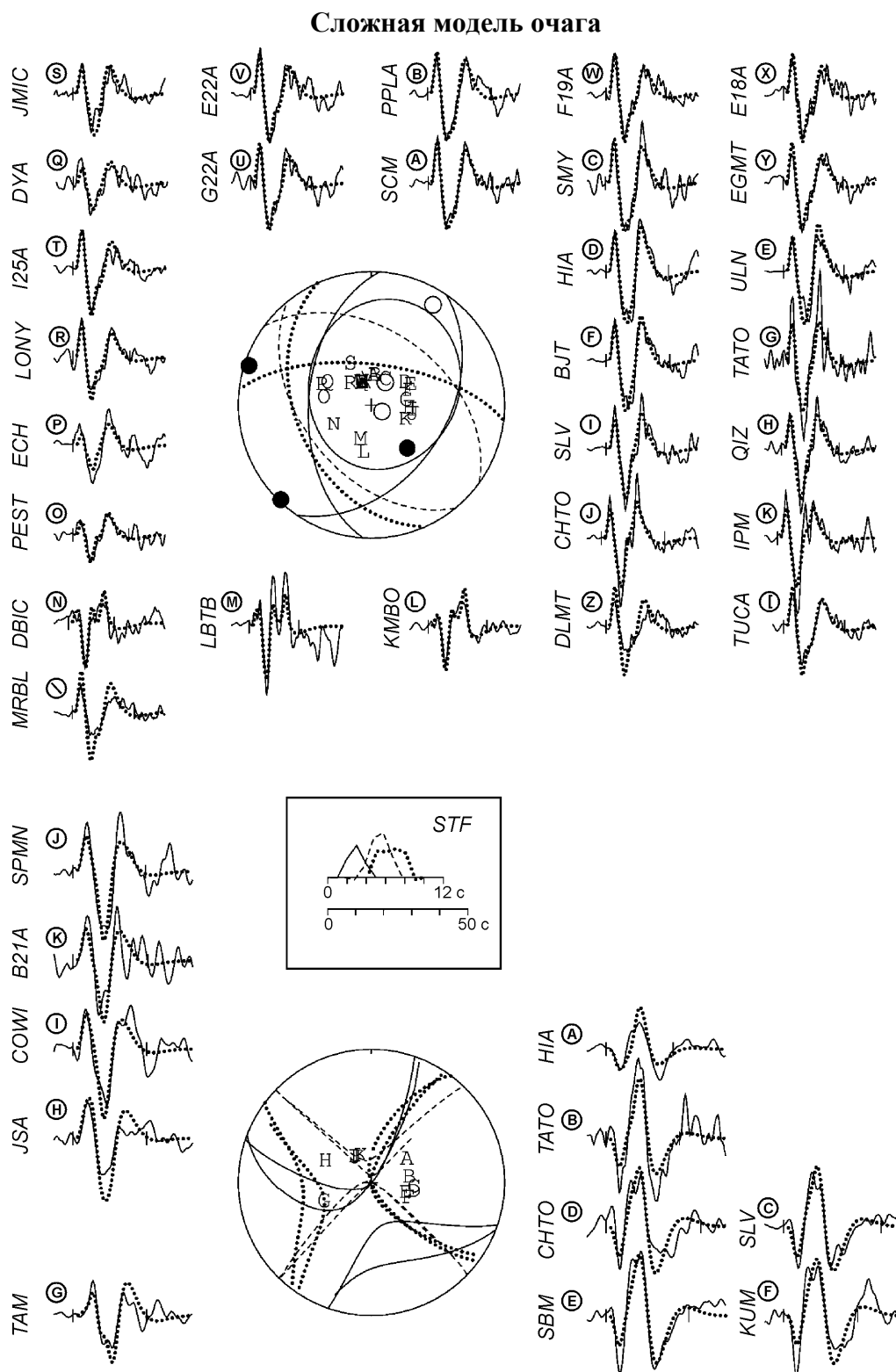


Рис. 7. Результаты инверсии для сложной модели очага по *P*-волнам (вверху) и по *SH*-волнам (внизу) с соответствующими нодальными плоскостями на фокальных сферах. На фокальных сферах: сплошные, штриховые и пунктирные линии – нодальные плоскости для трех субочагов; кружки с заливкой – оси сжатия для трех субочагов, кружки без заливки – оси растяжения для них. Остальные обозначения см. на рис. 6

треугольных импульсов с полупериодом 0.5 с (рис. 6, по центру в рамке). Напомним, что впервые этот прием был предложен в [Nabelek, 1984].

Было выполнено также моделирование для сложного очага. Для относительно небольшого очага, каким является очаг рассматриваемого землетрясения, его усложнение, на первый взгляд, выглядит искусственно. Однако оно может быть оправдано стремлением существенно улучшить соответствие расчетных сейсмограмм наблюдаемым.

Поскольку на временной функции источника для простого очага хорошо видны (см. рис. 6) три пика (экстремума), то при моделировании сложного очага мы предположили наличие трех субочагов. К сожалению, данных о детальном строении облака афтершоков авторам получить не удалось, и можно лишь предполагать, что очаг рассматриваемого землетрясения располагался в пределах северо-западной ветви очаговой зоны Рачинского землетрясения 1991 г. (см. рис. 3). Далее, формально предположив наличие трех субочагов, путем сопоставления и подбора параметров модели авторы добились наилучшего соответствия расчетных сейсмограмм наблюдаемым. При этом последовательно варьировались не только углы плоскостей разрывов (простираание, падение, подвижка), но и глубина субочагов, их взаимное положение и временная задержка между ними. Результаты реализации такого подхода представлены на рис. 7. Параметры различных моделей очага землетрясения 7 сентября 2009 г. приведены в табл. 2 (см. в конце статьи).

Обсуждение результатов

Как отмечалось выше, зона Рачинского землетрясения 1991 г. на протяжении почти двух десятилетий остается сейсмически высокоактивной, хотя до этого события в течение многих лет в районе отсутствовали сколь-либо сильные землетрясения. Среди известных моделей афтершоков нет ни одной, которая предусматривала бы столь длительное их проявление. Исследование этого феномена не является основной целью данной работы, однако обойти его молчанием, по мнению авторов, было бы неправильным. Результаты, полученные при моделировании такого события, как толчок 7 сентября 2009 г., говорят о том, что в последние годы заметно улучшились методы исследований и, что не менее важно, качество доступных данных, благодаря чему стало возможно детализировать процесс реализации очага даже среднего по магнитуде землетрясения, такого, как событие 7 сентября 2009 г. ($M_w=6.0$). Вероятно, в ближайшем будущем стоит пересмотреть моделирование основного толчка Рачинского землетрясения и его сильнейших афтершоков и проанализировать процесс в очаговой зоне с единых позиций.

Сопоставление полученной в настоящей работе модели очага для простого источника с решением *СМТ* показывает их большое сходство. В обоих случаях рабочая плоскость должна падать на север, исходя из общей сеймотектонической ситуации в очаговой зоне (Грузинская глыба поддвигается под Большой Кавказ). Плоскость в этом случае весьма пологая, что подтверждает старое предположение об активной покровной тектонике в районе [Fuenzalida et al., 1997].

Решение для сложного очага (три субочага), вообще говоря, неустойчиво: различные варианты, незначительно отличаясь друг от друга по соответствию волновых форм, дают существенно разные наборы механизмов. Для уменьшения неопределенности необходима дополнительная информация. При этом, компонента “недвойного диполя” (*NDC – non double couple*), определяемая в соответствии с [Dziewonski et al., 1981] как отношение наименьшего по абсолютной величине собственного значения тензора к наибольшему, в решении *СМТ* весьма мала – 2%.

Также уже отмечалось, что у нас нет детальных и достаточно точных данных по ближней зоне рассматриваемого землетрясения. Поэтому, интерпретируя полученные

результаты, можно отметить, что простой очаг удовлетворительно описывает источник. Однако уже на стадии решения задачи о простом источнике напрашивается модель сложного очага, состоящего из трех субочагов; соответствие наблюдаемых и расчетных волновых форм при этом оказывается значительно лучше. Сложный очаг для варианта полного тензора сейсмического момента дает большие значения изотропной компоненты, которые трудно проинтерпретировать для данной сеймотектонической ситуации.

Неустойчивость решения и отсутствие дополнительных данных не позволяют сделать окончательный выбор, хотя можно утверждать достаточно определенно, что сложная модель очага, состоящего из трех субочагов, описывает землетрясение 7 сентября 2009 г. наиболее адекватно. Наилучший с точки зрения соответствия наблюдаемых и расчетных сейсмограмм вариант, результаты расчетов для которого приведены выше на рис. 7, для наглядности продублирован еще раз на рис. 8.

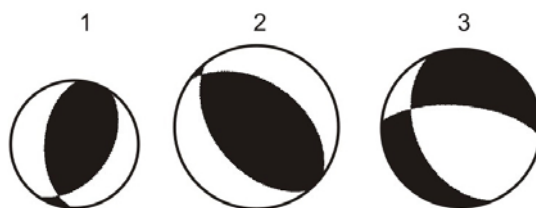


Рис. 8. Механизмы субочагов 1, 2, 3 (см. табл. 2)

Видно, что наиболее сильный субочаг 2 имеет механизм, близкий к механизму *СМТ* или механизму простого очага; механизмы субочагов 1, 3 заметно отличаются от них. Другими словами, очаг реализовался вначале движением по плоскости, почти перпендикулярной основной (это направление, кстати, соответствует известному разлому, см. рис. 3); затем произошло наибольшее по энергии или сейсмическому моменту движение по основному направлению и, наконец, несколько более слабая по энергии сбросовая подвижка по направлению, близкому к основному.

Заключение

Рассмотрено недавнее землетрясение на Центральном Кавказе и построена модель его очага. Ограниченные эпицентральные инструментальные наблюдения не позволили получить достаточное число хорошо определенных афтершоков, в связи с чем проанализировать детальную структуру облака афтершоков не удалось. Поэтому моделирование проводилось на основе данных мировой сети сейсмических станций методом инверсии объемных волн.

Установлено, что очаг землетрясения неплохо описывается двойным диполем; полученное в этом случае решение близко к *СМТ*. Усложнение очага ведет к улучшению соответствия расчетных сейсмограмм наблюдаемым, однако значения сейсмического момента для субочагов оказываются завышенными. При этом для полного тензора сейсмического момента получается физически труднообъяснимое большое значение изотропной компоненты, что, скорее всего, является артефактом. Уверенно можно утверждать лишь то, что очаг рассматриваемого землетрясения был сложным, состоящим из трех субочагов.

Высказано предположение, что Рачинское землетрясение 1991 г., возможно, предельное по магнитуде для данного района, настолько сильно поменяло сеймотектоническую обстановку в своей очаговой зоне, что, как показывают наблюдения в течение последовавших за событием двадцати лет, район стал намного более сейсмически активным, чем был до землетрясения.

Таблица 1. Окончательный список сейсмических станций,
по записям которых проводилась инверсия

№	Код по каталогу	Страна	Координаты		Волна
			Широта	Долгота	
1	<i>SCM</i>	США	61.8	-147.3	<i>P</i>
2	<i>PPLA</i>	США	62.9	-152.2	<i>P</i>
3	<i>SMY</i>	США	52.7	174.1	<i>P</i>
4	<i>HIA</i>	Китай	49.3	119.7	<i>P</i>
5	<i>ULN</i>	Монголия	47.9	107.1	<i>P</i>
6	<i>VJT</i>	Китай	40.0	116.2	<i>P</i>
7	<i>TATO</i>	Тайвань	25.0	121.5	<i>P</i>
8	<i>QIZ</i>	Китай	19.0	109.8	<i>P</i>
9	<i>SLV</i>	Тайвань	21.3	103.9	<i>P</i>
10	<i>CHTO</i>	Таиланд	18.8	98.9	<i>P</i>
11	<i>IPM</i>	Малайзия	4.5	101.0	<i>P</i>
12	<i>KMBO</i>	Кения	-1.1	37.3	<i>P</i>
13	<i>LBTV</i>	Ботсвана	-25.0	25.6	<i>P</i>
14	<i>DBIC</i>	Кот-д'Ивуар	6.7	-4.9	<i>P</i>
15	<i>PEST</i>	Португалия	38.9	-7.6	<i>P</i>
16	<i>ECH</i>	Франция	48.2	7.2	<i>P</i>
17	<i>DYA</i>	Великобритания	50.4	-3.9	<i>P</i>
18	<i>LONY</i>	США	44.6	-74.6	<i>P</i>
19	<i>JMIC</i>	Норвегия	71.0	-8.5	<i>P</i>
20	<i>I25A</i>	США	44.0	-103.7	<i>P</i>
21	<i>G22A</i>	США	45.2	-106.3	<i>P</i>
22	<i>E22A</i>	США	46.4	-105.9	<i>P</i>
23	<i>F19A</i>	США	45.9	-108.9	<i>P</i>
24	<i>E18A</i>	США	46.6	-109.9	<i>P</i>
25	<i>EGMT</i>	США	48.0	-109.8	<i>P</i>
26	<i>DLMT</i>	США	45.4	-112.6	<i>P</i>
27	<i>TUCA</i>	США	46.5	-118.1	<i>P</i>
28	<i>MRBL</i>	США	48.5	-121.5	<i>P</i>
29	<i>HIA</i>	China	49.3	119.7	<i>SH</i>
30	<i>TATO</i>	Taiwan	25.0	121.5	<i>SH</i>
31	<i>SLV</i>	Таиланд	21.3	103.9	<i>SH</i>
32	<i>CHTO</i>	Таиланд	18.8	98.9	<i>SH</i>
33	<i>SBM</i>	Малайзия	2.5	112.2	<i>SH</i>
33	<i>KUM</i>	Малайзия	5.3	100.6	<i>SH</i>
35	<i>TAM</i>	Алжир	22.8	5.5	<i>SH</i>
36	<i>JSA</i>	Исландия	49.2	-2.2	<i>SH</i>
37	<i>COWI</i>	США	46.1	-89.1	<i>SH</i>
38	<i>SPMN</i>	США	45.2	-92.8	<i>SH</i>
39	<i>B21A</i>	США	48.4	-107.0	<i>SH</i>

Примечание. Значения координат со знаком минус – западная долгота и южная широта.

Таблица 2. Параметры очага землетрясения 7 сентября 2009 г.

Параметры	Простая модель очага			Сложная модель очага		
	<i>СМТ</i>	<i>PDE</i>	<i>DC</i> (наст. работа)	Субочаг 1	Субочаг 2	Субочаг 3
Простираение	314	299	310	184	306	156
Падение	28	31	31	51	44	43
Подвижка	106	90	98	70	79	-37
M_0 , 10^{25} дин·см	1.16	0.73	0.958	0.857	1.513	1.388
M_w	6.0	5.9	6.0			
M дивiator, 10^{25} дин·см				0.846	1.027	0.761
M изотроп., 10^{25} дин·см				-0.109	-0.907	0.948

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 08-05-00598 и 10-05-00126).

Литература

- Арефьев С.С.* Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: Академкнига, 2003, 376 с.
- Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э. и др.* Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений // Физика Земли. 1993. № 3. С.12–23.
- Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Быкова В.В., Дорбат К.* Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмическим данным // Физика Земли. 2006. № 1. С.30–44.
- Рогожин Е.А., Арефьев С.С., Богачкин Б.М., Систернас А., Филип Э.* Комплексный анализ геологических и сейсмологических данных и сейсотектоническое представление об очаге Рачинского землетрясения // Физика Земли. 1993. № 3. С.70–77.
- Рогожин Е.А., Арефьев С.С., Мараханов А.В., Овсяченко А.Н., Новиков С.С., Матвеев И.В., Молотков С.Г.* Недавнее землетрясение на Центральном Кавказе // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 4. С.64–66.
- Dziwonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P.2825–2852.
- Fuenzalida H., Rivera L., Arefiev S. et al.* Seismic source study of the Racha-Dzhava (Georgia) earthquake from aftershocks and broad-band teleseismic body-wave records: an example of active nappe tectonics // Geophys. J. Intern. 1997. V. 130. P.29–46.
- Nabelek J.* Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves // Ph.D. Thesis M.I.T. 1984. Cambridge Massachusetts. 361 p.
- Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A.* The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision // Tectonophysics. 1989. V. 161. P.1–21.
- Rebai S., Philip H., Dorbath L. et al.* Active tectonics in the lesser Caucasus: coexistence of compressive and extensional structures // Tectonics. 1993. V. 12, N 5. P.1089–1114.
- Zwick P., McCaffrey R., Abers G.* MT5 Program: International association of Seismology and Physics of Earth's Interior Software Library. 1994. V. 4.

Сведения об авторах

АРЕФЬЕВ Сергей Сергеевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-53-16. E-mail: sserg@ifz.ru

БЫКОВА Вера Вячеславовна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-53-16. E-mail: vvb@ifz.ru

ВАКАРЧУК Роман Николаевич – аспирант, инженер-исследователь, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-30-42. E-mail: bph@ifz.ru

SOURCE MODEL OF THE CENTRAL CAUCASUS EARTHQUAKE, SEPTEMBER 7, 2009

S.S. Arefiev, V.V. Bykova, R.N. Vakarchuk

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. On September 7, 2009, the earthquake ($M_w=6.0$) occurred on the southern slope of Central Caucasus in the source zone of the Racha earthquake, 1991, that was studied in detail using field epicentral observations. Limited epicentral observations were also organized in 2009; however, they did not allow to reveal the detailed structure of the source zone due to their restrained character. To model the seismic source by waveform inversion, the data of worldwide system of seismological observations (IRIS project) were collected and necessary calculations were carried out using MT5 software. It is obtained that the source is rather adequately described by the simple double couple model. The best coincidence between the observed and the synthetic waveforms is achieved in calculations of the complete tensor of the seismic moment for the model consisting of three sub-sources. However, in this case, the isotropic component of the seismic moment tensor is anomalously large, which requires a very careful using of these results.

Keywords: aftershock, seismic source, waveform inversion, seismogram.