

УДК 550.34

КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1 МАЯ 2011 ГОДА

Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Рассмотрен вопрос параметризации основного толчка землетрясения 1 мая 2011 г. с магнитудой $m_b=5.6$. Изучены пространственные характеристики очага, механизм и тензор момента центра (СМТ), закономерности афтершоковой деятельности. С большой вероятностью установлена плоскость разрыва в очаге.

1 мая 2011 г. в 08 часов 31 минуту по местному времени жители г. Алматы ощутили землетрясение, интенсивность которого на территории города составила 4 – 5 баллов. Событие такой интенсивности последний раз на территории города отмечалось более трех лет назад. Особенностью землетрясения 1 мая 2011 г. явилось то, что после него в течение всего дня и последующей ночи неоднократно повторялись ощутимые толчки небольшой интенсивности. Так, уже через 34 минуты после первого толчка повторились колебания с интенсивностью 2 – 3 балла, через шесть часов – с интенсивностью 3 – 4 балла. К вечеру 1 мая 2011 г. колебания от землетрясений жители почувствовали не менее 6 раз. Сведения о регистрируемых толчках, аналитические обзоры о происходящем сейсмическом событии и его афтершоках в круглосуточном режиме оперативно предоставлялись на веб-сайте Центра данных РГП ИГИ (www.kncd.kz). Посещение веб-сайта жителями Алматы за эти сутки было рекордным и достигало десятков тысяч. Однако избежать паники в городе не удалось. К ночи многие люди с вещами вышли на улицу с намерением ночевать там в ожидании более сильного землетрясения. Только после полуночи, после выступления по телевидению представителей Министерства по чрезвычайным ситуациям и Института сейсмологии РК, удалось успокоить людей. Следует отметить, что землетрясению 1 мая 2011 г., несмотря на его небольшую силу по меркам глобальной сейсмологии, уделялось особое внимание и в мировых центрах данных, что объясняется его близостью к крупнейшему мегаполису Казахстана. Так, в Европейском средиземноморском Центре данных (EMSC) этому землетрясению был посвящен специальный отчет, представленный на веб-сайте www.emsc-csem.org. В настоящей статье приводится подробный отчет о землетрясении 01 мая 2011 г. по казахстанским данным (КНЦД – Ка-

захстанский национальный центр данных, СОМЭ – сейсмологическая опытно-методическая экспедиция) и материалам ряда зарубежных Центров обработки данных: EMSC, USGS (United States Geological Survey, США), ГС (Геофизическая служба) РАН.

Координаты гипоцентра и магнитуда землетрясения по разным источникам приведены в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, различие в положении гипоцентра землетрясения по разным источникам не превышает 0.2° по широте, 0.07° по долготе и 3 км по глубине. По инструментальным данным РК гипоцентр землетрясения расположен (рисунок 1) южнее Капчагайского водохранилища в Алматинской впадине на глубине 22 км и приурочен к узлу пересечения разломов высших порядков, выделенных по результатам дешифрирования космоснимков. Один из разломов субпараллелен Капчагай-Чиликскому сдвигу, другой – имеет северо-восточное простирание.

Алматинская впадина является слабосейсмичной зоной, разделяющей Северо-Тянь-Шаньскую и Жонгарскую сейсмоактивные зоны Казахстана. Кристаллический фундамент каледонской консолидации перекрыт здесь толщами мезо-кайнозойских пород. По данным сейсмического районирования Казахстана [1] сейсмopotенциал ближайшей сейсмогенерирующей (Алтынэмельской) зоны на севере составляет 6.5. На юге, в Алматинской сейсмогенерирующей зоне, максимально сильными могут быть землетрясения с магнитудой 7.0. Основная масса слабых землетрясений, зарегистрированных ранее, приурочена к Алматинскому прогибу, небольшая их часть трассирует Капчагай-Чиликский разлом. Южнее этого разлома 23.08.1960 г. было зарегистрировано событие с $M_s=4$, которое до землетрясения 01.05.2011 г. являлось самым сильным в Алматинской впадине (рисунок 2).

Таблица 1. Характеристики Капчагайского землетрясения 1 мая 2011 года по инструментальным данным

Источник	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Время t_0 , ч:м:с	Магнитуда m_b	Глубина H , км
USGS(США)	43.543	77.737	2:31:29	5.4	20
EMSC(Франция)	43.63	77.76	2:31:29	5.4	23
ГС РАН (Россия)	43.75	77.69	2:31:28.3	5.1	20
РК (КНЦД+СОМЭ)	43.62	77.70	2:31:28.6	5.6	22

КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ
1 МАЯ 2011 ГОДА



(1 – 4) – эпицентры: 1- землетрясения 01.05.2011, 2 – афтершоков с $M \geq 4$, 3- афтершоков с $M < 4$; 4 – землетрясения 1960 г.; 5 – разлом

Рисунок 1. Эпицентры главного толчка Капчagaiского землетрясения и его афтершоков, стереограммы механизма очага главного толчка, определенногo по стандартной методике (МО) и СМТ (определение GFZ)



1 – катастрофические землетрясения с магнитудой $M_s \geq 7.1$; 2 – $M_s \geq 6$; 3 – $M_s \geq 5$; 4 – $M_s \geq 4$; 5 – $M_s \geq 3$,
звездочка – эпицентр землетрясения 1.05.2011 г.

Рисунок 2. Схема расположения эпицентров землетрясений в Северном Тянь-Шане и Джунгарии за весь исторический период

**КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ
1 МАЯ 2011 ГОДА**



а – коэффициент Лоде-Надаи

б – угол погружения оси максимального удлинения

в – угол погружения оси максимального укорочения

Рисунок 3. Характер сейсмоструктурного деформирования за два года до Капчагайского землетрясения и стереограммы фокальных механизмов главного толчка и наиболее сильных афтершоков на схеме разломов (желтые точки – слабые афтершоки)

Таблица 2. Параметры механизма очага Капчагайского землетрясения по данным регионального и СМТ (GFZ) каталогов

№	Каталог	AzP	eP	AzT	eT	AzN	eN	STR1	DIP1	SLIP1	STR2	DIP2	SLIP2	N
1	МО (КНЦД)	182	14	118	61	85	25	122	38	135	252	64	62	51
2	СМТ(GFZ)	175	15	121	65	79	19	110	34	125	249	63	69	12

На рассматриваемой территории Капчагай-Чиликский разлом относится к наиболее крупным (трансрегиональным) сдвигам, он протягивается от хребтов Кокшаал-Тау под кайнозойские отложения Южно-Прибалхашской впадины. Простирается разлома СЗ 300° – 305°, падение плоскости разлома крутое, почти вертикальное. По существующим представлениям вдоль субтрансформных сдвигов в результате субмеридионального сжатия происходит движение литопластин верхней части земной коры в виде конвейера и образование асимметричных (вергентных) чешуйчато-надвиговых складчато-глыбовых морфоструктур. Капчагай-Чиликский сдвиг является границей между Жонгаро-Кетменской и Кунгей-Заилийской разнонаправленными системами морфоструктур. В первой из них движение деформируемых блоков земной коры происходит в юго-восточном направлении, во второй – в северо-западном направлении [1]. Фоновое сейсмоструктурное деформирование (СТД) в рассматриваемом районе Алматинской впадины характеризуется условиями одноосного горизонтального укорочения и вертикального удлинения [2]. С 2007 г. наблюдалось противофазное изменение параметров СТД в соседних ячейках указанного района, и уже в 2009 г. сформировались участки с контрастными параметрами сейсмоструктурного деформирования, вблизи границ которых 1 мая 2011 г. реализовалось землетрясение. На рисунке 3 показано распределение по площади параметров СТД: коэффициента Лоде-Надаи (а), характеризующего тип деформирования, и углов погружения (с горизонталью) осей максимального удлинения (б) и укорочения (с). Фоновый характер деформирования – одноосное горизонтальное укорочение при вертикальном максимальном удлинении – сохранился юго-восточнее очага.

Севернее очага деформирование среды одноосным укорочением происходило при горизонтальном максимальном удлинении в субширотном направлении. К западу и северо-востоку от очаговой зоны сформировался контрастный тип деформирования – одноосное горизонтальное удлинение, причем ориентация максимального укорочения изменяется на близвертикальную. Как известно, рассогласованность параметров СТД в соседних точках области компенсируется дополнительными внутренними упругими деформациями и напряжениями и может инициировать разрушение [3, 4], что и произошло вблизи границ контрастно деформированных зон в Алматинской впадине 1.05.2011 г.

Фокальный механизм главного толчка получен двумя методами: по методу тензора центроида сейсмического момента (СМТ) с использованием данных 12 станций в Центре геофизических исследований (GFZ) ФРГ и по первым смещениям Р-волн, зарегистрированных сейсмическими сетями РК (ИГИ и СОМЭ), KNET, CAREMON. О надежности решения фокального механизма по первым вступлениям объемных волн свидетельствует использование 51 равномерно распределенных знаков, согласованность которых составила 98%, а вариации параметров не превысили 1 – 2°. Параметры фокального механизма, определенные по двум методам: МО – и СМТ – приведены в таблице 2, а стереограммы показаны на карте эпицентров главного толчка и его афтершоков (рисунок 1).

Видно, что решения по двум методам хорошо согласуются, максимальная разница в значениях параметров не превышает 12°. По результатам решения механизма очага землетрясение реализовалось под действием системы напряжений, характеризуемой близгоризонтальной и субмеридиональной ориента-

цией оси напряжения сжатия, и субширотной, круто погружающейся оси напряжения растяжения. Одна из нодальных плоскостей имеет северо-восточное простирание (STR2) и крутое падение (64°) в северо-западном направлении, подвижка по этой плоскости характеризуется взбросом. Другая плоскость северо-западного простирания (STR1) полого падает на юго-запад. Висячее юго-западное крыло смещено по простиранию этой плоскости в северо-западном направлении и вверх. Подобие решений по стандартной методике и по методу СМТ, отражающих, соответственно, первое движение по разрыву и характер разрыва в главной фазе, свидетельствует, что характер подвижки и ориентация разрыва при его развитии не изменяется. Найденная ориентация разрывов в очаге согласуется с направлением разломов высшего порядка, к пересечению которых приурочен эпицентр землетрясения. В результате подвижки по одному из них и произошло снятие возникших в блоке напряжений.

Для установления истинного направления разрыва протяженного очага применена методика Горбуновой И.В. [5], основанная на построении и анализе азимутального годографа. Годограф построен с использованием материалов станций СОМЭ. По вертикальной шкале приведены значения $\delta t = (t_{p_{\max}} - t_{p_1})$, где $t_{p_{\max}}$ – время наступления максимума в цуге Р-волн, t_{p_1} – время первого вступления Р-волны (рисунок 4).

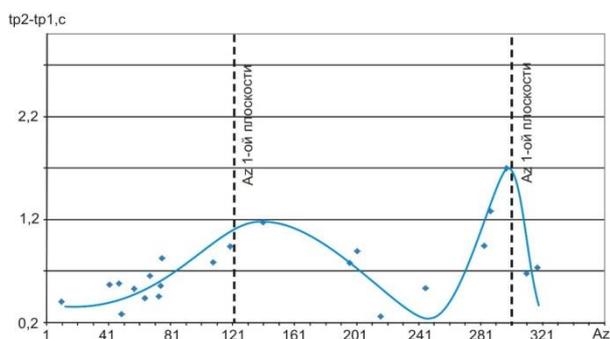


Рисунок 4. Азимутальный годограф для землетрясения 1.05.2011 г.

Из рисунка 4 видно, что годограф имеет два четко выраженных максимума, разнесенных на $\approx 180^\circ$, что характерно для двунаправленного разрыва. Однако, на основании того, что максимумы годографа выражены слабо, можно предположить, что распространение разрыва происходило как по простиранию плоскости в обе стороны, так и по падению плоскости. Сопоставление с механизмом очага показывает соответствие максимумов азимутам простирания первой нодальной плоскости (на рисунке 4 – пунктирные линии). Из такого вида азимутального годографа следует, что ориентация плоскости разрыва близка к 301° (121°), вдоль этой плоскости разрыв распространялся как в северо-западном, так

и юго-восточном направлении и вверх по падению плоскости.

Главное событие предварял слабый форшок с $K=5.8$, зарегистрированный за 2.5 часа. После землетрясения последовала серия афтершоков, аномально высокая как по общему числу повторных толчков для такого сравнительно несильного главного толчка, так и по количеству относительно сильных афтершоков с $K \geq 9$. Всего в каталог и сейсмологические бюллетени включено более 200 афтершоков этого землетрясения, большая часть из которых была зарегистрирована в первые 10 дней. Распределение афтершоков по энергии и во времени характеризует рисунок 5: тринадцать наиболее сильных толчков с $K \geq 9$ произошли в первые 4 дня. Через месяц, 2 июня, был зарегистрирован еще один афтершок с $K=9$.

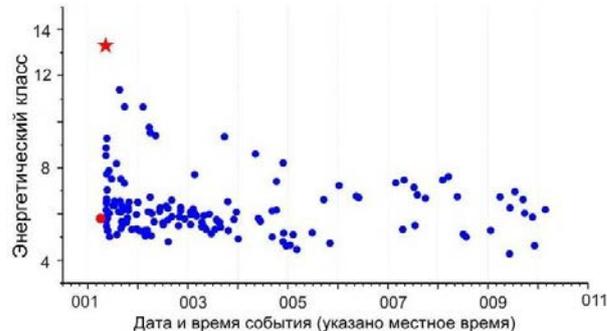
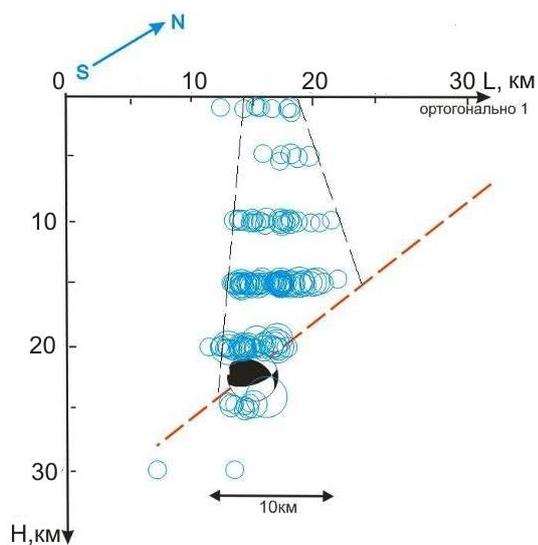


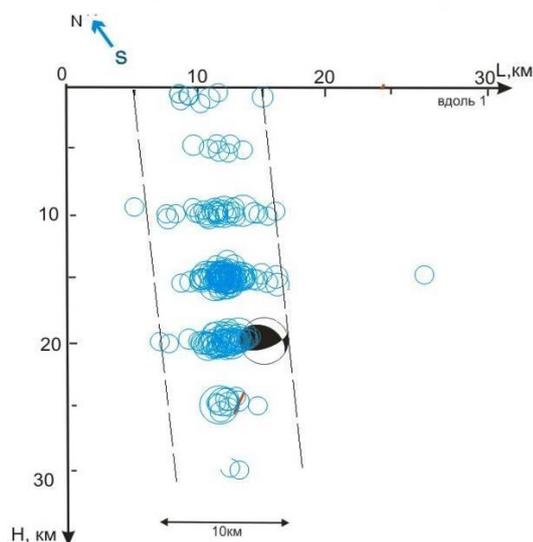
Рисунок 5. Затухание афтершоковой деятельности в очаге Капчагайского землетрясения

Афтершоковая активизация происходила в компактном объеме геологической среды изометричной формы, ограниченном со всех сторон разломами высокого порядка – субпараллельными и секущими Капчагай-Чиликский сдвиг. Все наиболее сильные повторные толчки с $K \geq 9$ сконцентрированы в области еще меньших размеров (рисунок 1). Линейные размеры основного облака афтершоков в плане составляют $10 \text{ км} \times 10 \text{ км}$. Примерно в 10 км западнее основной афтершоковой области, в равновеликом блоке, расположен эпицентр землетрясения 1960 г. Следует отметить приуроченность очага этого землетрясения, как и очага землетрясения 2011 г., к узлу пересечения разрывов, ориентированных субпараллельно и вкрест Капчагай-Чиликскому сдвигу.

Известно, что только по положению облака афтершоков в плане нельзя делать выводы о направлении и размерах разрыва в главном толчке. Необходимо проанализировать объемную модель очага в земной коре. Поэтому было рассмотрено распределение проекций гипоцентров афтершоков на вертикальные плоскости, ориентированные по простиранию и ортогонально первой и второй нодальным плоскостям главного толчка (рисунок 6).



а – ортогональная плоскость



б – простирание первой нодальной плоскости

Рисунок 6. Облака афтершоков по глубинным разрезам, ориентированным ортогонально и по простиранию первой нодальной плоскости главного толчка землетрясения 1 мая 2011 г.

Анализ глубинного распределения афтершоков показал, что большинство гипоцентров распределено в земной коре на глубине 20 – 10 км, а наиболее сильные толчки – на глубине не менее 15 км. Выше отметки 10 км зафиксированы только единичные очаги. Наилучшим образом распределению афтершоков в разрезе соответствует ориентация первой нодальной плоскости главного толчка (STR1). Все афтершоки расположены в южном висячем крыле первой нодальной плоскости (рисунок 6а), глубины их гипоцентров уменьшаются вдоль пологой плоскости с удалением от главного толчка на север. Выше глубины 15 км распределение гипоцентров изменяется, они выстраиваются вдоль крутой плоско-

сти, составляющей клинообразную структуру с плоскостью 1 главного толчка. Такой же крутой плоскостью ограничено распределение афтершоков к югу от очага. Полученное распределение афтершоков на разрезе, ортогональном простиранию первой нодальной плоскости, позволяет предположить, что имеющиеся в этой зоне тектонические разрывы, субпараллельные Капчагай-Чиликскому сдвигу, круто падают в противоположные стороны и являются естественным ограничением очага с юга и севера. Вдоль простирания плоскости 1 (рисунок 6-б) распределение афтершоков с востока и запада ограничено крутыми плоскостями, которые в плане соответствуют разрывам, ориентированным вкост Капчагай-Чиликскому сдвигу. Геометрические размеры очага, оцененные по вертикальным разрезам распределения афтершоков (рисунок 6), составляют: 20 км × 10 км × 10 км. Такие размеры очага по существующим зависимостям [6], связывающим размеры очага с магнитудой, соответствуют $M=5$ и фиксированы размерами блока между разломами высокого порядка. Одинаковые вертикальные и горизонтальные размеры очага свидетельствуют об одинаковом развитии разрыва по падению плоскости вверх и по ее простиранию, что подтверждает сделанные выше выводы.

Для 14 наиболее сильных афтершоков найдены решения фокальных механизмов. Анализ простирания нодальных плоскостей (рисунок 7) и характера подвижек показал подобие их главному толчку.

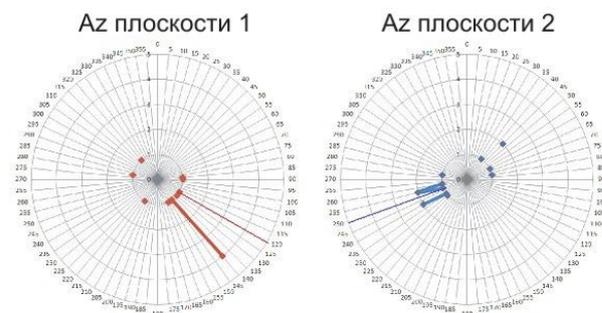


Рисунок 7. Диаграммы распределения азимутов простирания нодальных плоскостей афтершоков Капчагайского землетрясения 01.05.2011 г.

Вероятно, повторные толчки, как и главное событие, генетически связаны с имеющимися в очаговой зоне разломами, субпараллельными Капчагай-Чиликскому сдвигу, либо с секущими его разрывами. Очаги пяти афтершоков, как и главного толчка, реализовались в условиях регионального поля напряжений, характеризующегося горизонтальным сжатием в субмеридиональном направлении и вертикальным растяжением. Восемь афтершоков, в том числе июньский с $K=9$, произошли под действием близгоризонтально ориентированных осей напряжений сжатия и растяжения, чем обусловлены сдвиговые подвижки по простиранию обеих плоскостей.

В процессе афтершоковой деятельности снимались напряжения, сформировавшиеся в очаговой зоне перед землетрясением. Релаксация напряжений происходила в результате взбросо-сдвиговых и сдвиговых подвижек по плоскостям либо северо-восточного, либо северо-западного направления, согласующегося с простиранием имеющихся в зоне разломов высокого порядка, преимущественно на глубине $H > 10$ км. Следует отметить, что рассматриваемая зона Алматинской впадины расчленена разломами высокого порядка на примерно равновеликие блоки, что хорошо видно из рисунка 9.

В дизъюнктивных узлах двух таких блоков произошли землетрясения 1960 и 2011 гг. с $M=4 - 5$. В условиях следующей активизации подобные блоки вдоль Капчагай-Чиликского сдвига можно рассматривать как места будущих землетрясений с аналогичными геометрическими размерами и $M \approx 5$.

ПАРАМЕТРЫ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Для анализа использованы записи ускорений колебаний грунта в двух пунктах: на станции KNDC в г. Алматы (главного толчка и девяти афтершоков) и на станции Подгорная (главного толчка). Станция KNDC находилась на расстоянии 79 км от эпицентра, станция Подгорная – 153 км. Оценены характеристики записей и соответствующих им спектров реакции. На рисунке 10 приведены акселерограммы землетрясения 1 мая в 02^h31^m, зарегистрированные станцией KNDC, а на рисунке 11 – станцией Подгорная (PDGN).

При главном толчке пиковые ускорения грунта в

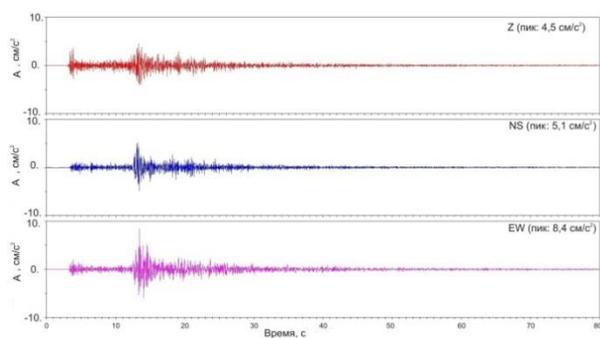


Рисунок 10. Акселерограммы главного толчка. Станция KNDC

пункте KNDC составили 8.4 см/с^2 . По шкале интенсивности землетрясений MSK-64 (K) [8] такие значения характеризуют интенсивность 4 балла. Станция KNDC расположена в южной части города. Сильнее это землетрясение ощущалось в северной части г. Алматы, где интенсивность могла достигать 5 баллов. Как следует из значений амплитуд, приведенных в таблице 3, афтершок в 20^h29^m 1 мая 2011 г. имел такие же амплитуды ускорений, как и при главном толчке – на уровне 8 см/с^2 .

Однако магнитуда этого афтершока была намного меньше, чем у главного толчка ($m_p v=4.25$ против $m_p v=5.34$). На самом деле, при этом афтершоке высоких значений достигла амплитуда только одного колебания (рисунок 12), чем и объясняется его меньшая интенсивность по сравнению с главным толчком.

По каждой акселерограмме были построены спектры реакций, позволившие оценить преобладающие периоды колебаний при землетрясении и его афтершоках. На рисунке 13 представлены результаты обработки акселерограмм главного толчка с использованием программы View Wave (автор Т. Кашима). Спектры реакции строились для наиболее интенсивной части акселерограммы, включающей S-волну. Максимальные воздействия при горизонтальных колебаниях были достаточно высокочастотны. Преобладающие периоды составляют 0.13 с. На вертикальной компоненте отмечаются несколько больших периодов колебаний – 0.22 с. Максимальные ускорения спектров реакции достигают значений 25 см/с^2 .

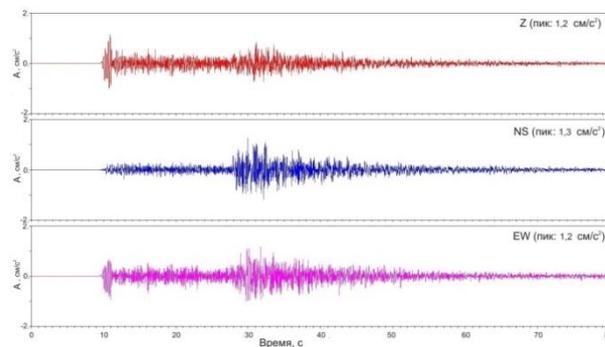


Рисунок 11. Акселерограммы главного толчка. Станция PDGN

Таблица 3. Параметры сильных движений (максимальные амплитуды ускорений)

Дата	Время, ч. м.	KNDC			PDGN		
		$A_N, \text{ см/с}^2$	$A_E, \text{ см/с}^2$	$A_Z, \text{ см/с}^2$	$A_N, \text{ см/с}^2$	$A_E, \text{ см/с}^2$	$A_Z, \text{ см/с}^2$
1.05.2011	02-31	5,1	8,4	4,5	1,3	1,2	1,2
1.05.2011	03-05	0,6	0,3	0,2			
1.05.2011	09-13	2,2	2,1	1,3			
1.05.2011	11-37	3,7	1,8	1,1			
1.05.2011	20-29	8,7	8,7	1,6			
1.05.2011 (двойной толчок)	23-27	1,4	1,0	0,3			
1.05.2011	23-52	1,3	1,2	0,3			
2.05.2011	02-31	1,1	0,7	0,3			

**КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ
1 МАЯ 2011 ГОДА**

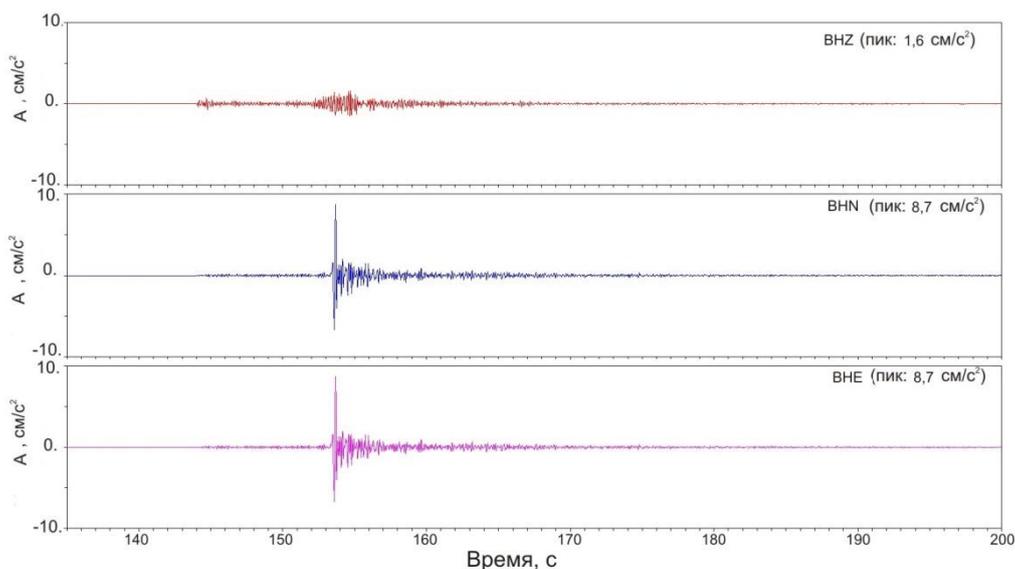
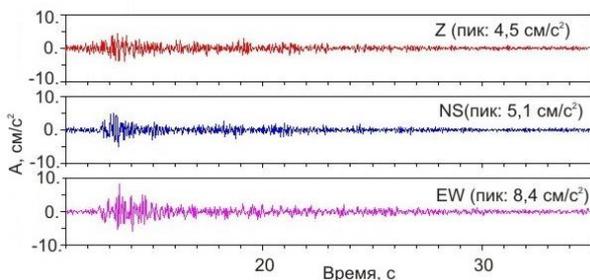
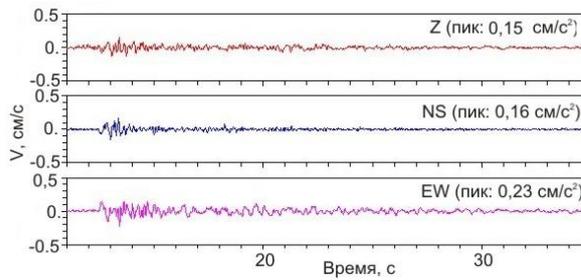


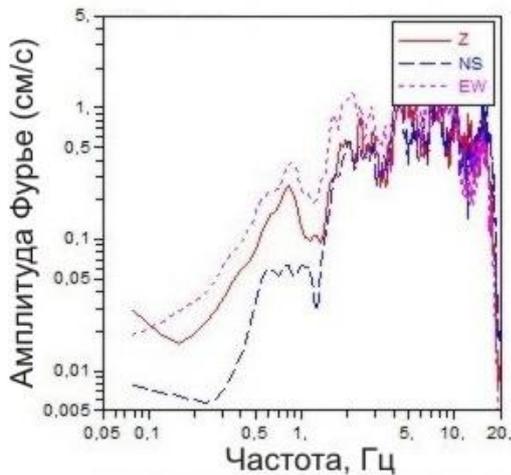
Рисунок 12. Акселерограммы афтершока землетрясения 1 мая 2011 г. в 20^h 29^m



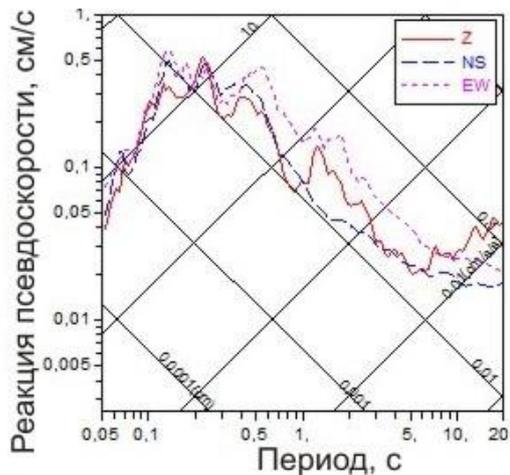
а – записи ускорений S-волн некорректированные



б – расчетные трассы скоростей колебаний грунта



в – спектр Фурье (время: 11-35 с)



г – спектры реакции ($h=5\%$)

Рисунок 13. Результаты обработки акселерограмм главного толчка по записям станции KNDC

Выводы

Капчагайское землетрясение реализовалось под действием регионального напряжения сжатия в субмеридиональном направлении вблизи границ зон с контрастными параметрами сеймотектонического деформирования.

Гипоцентры главного и повторных толчков располагались в блоке между разломами высокого порядка, ориентированными субпараллельно и вкрест простираения Капчагай-Чиликского сдвига и генетически с ними связаны. Геометрические размеры очаговой зоны ограничены размерами блока и соответ-