

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА КУРЧАЛОЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**11 октября 2008 г. с $K_p=14.5$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$ (Чеченская Республика)****Габсатарова И.П.**Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, ira@gsras.ru

11 октября 2008 г. в 09^h06^m на территории Чеченской Республики произошло 7–8-балльное землетрясение, ставшее сильнейшим в начале XXI в. на Северном Кавказе. Наибольшие разрушения произошли в Курчалойском, Гудермесском, Шалинском и Ножай-Юртовском районах Чеченской Республики (ЧР), подробно описанное в статье [1] наст. сб. Землетрясение получило имя «Курчалойское» по названию одного из наиболее пострадавших сел.

Основной толчок и многочисленные ($N_{\Sigma}=1003$ [2]) его афтершоки были зарегистрированы наиболее близкой к очагу станцией «Грозный», станциями сетей Северо-Осетинского и Дагестанского филиалов и другими станциями ГС РАН. Динамический диапазон многих станций, расположенных на расстояниях до 150 км, не позволил без «зашкала» зарегистрировать землетрясение даже на каналах пониженной чувствительности, т.к. подавляющее число станций были оснащены 16-разрядным регистрационным оборудованием (SDAS) [3]. А на ближайшей к эпицентру станции «Грозный» ($\Delta=47$ км) имелась качественная волновая картина (рис. 1), т.к. она была оснащена 24-разрядным оборудованием UGRA [4]. Для уточнения параметров основного толчка и наиболее значительных афтершоков использовались времена вступления на станциях и метод двойных разностей [5, 6]. Это позволило более уверенно определить координаты эпицентров и глубины очагов основного толчка и афтершоков. В частности, при определении параметров гипоцентра основного толчка использовались данные 43 сейсмических станций, ближайшая из которых – «Грозный» – находится на расстоянии $\Delta=47$ км, наиболее удаленные – «Сочи» и «Симферополь» – около 600 и 1000 км соответственно.

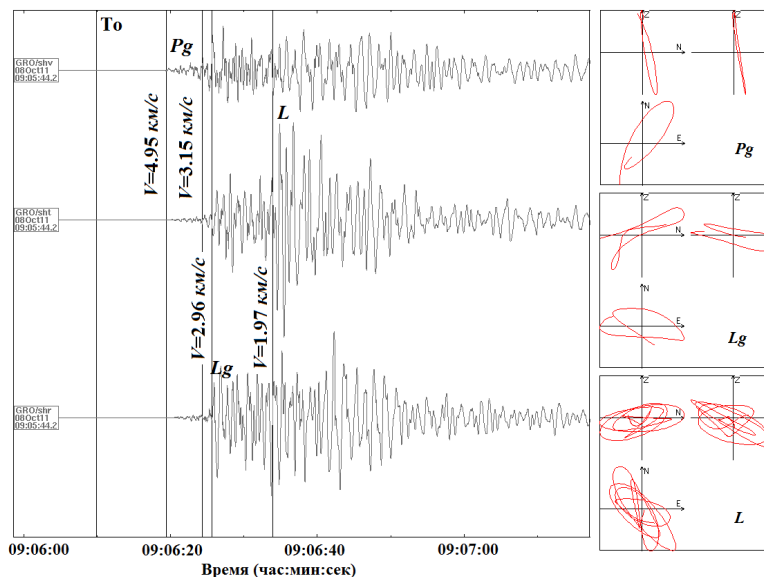


Рис. 1. Трехкомпонентные записи землетрясения 11 октября на станции «Грозный», трансформированные на вертикальную (верхняя), трансверсную (средняя) и радиальную (нижняя) компоненты в направлении очаг–станция с $Az=257^\circ$

Волновая картина на записи станции «Грозный» имеет специфические особенности, заключающиеся в преобладании в спектре низких ($f \leq 4$ Гц) частот (рис. 2), что, как правило, не характерно для записи тектонического землетрясения на небольших расстояниях. Кроме того,

судя по поляризации в объемных Pg -волнах (рис. 1), затруднено выделение плоскополяризованного цуга, т.к. картина осложнена присутствием каналовых волн, имеющих эллиптическую поляризацию.

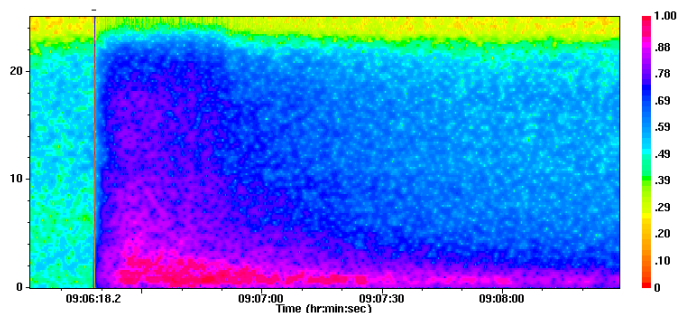


Рис. 2. Спектрограмма двухминутного фрагмента записи вертикальной компоненты станции «Грозный»

По вертикали отложены частоты, по горизонтали – время; цветом показан уровень спектра мощности, нормированный на максимальное ее значение.

Вероятно, такая картина и относительное «поглощение» высоких частот в спектре может быть частично объяснены расположением эпицентра вблизи одной из довольно больших тектонических структур, с которой связано Гудермесское нефтегазовое месторождение [7]. Сама станция, как указывалось в [8], расположенная в Чечен-Ауле, находится на южном борту антиклинальной структуры, с которой связано Октябрьское нефтегазовое месторождение, приуроченное к Пшекиш-Тырныауз-Сунженскому глубинному разлому (рис. 3).

Гудермесское месторождение, открытое в 1969 г., входит в состав восточной части Терской антиклинальной зоны и представляет собой антиклинальную складку субширотного простирания, осложненную тектоническими нарушениями.

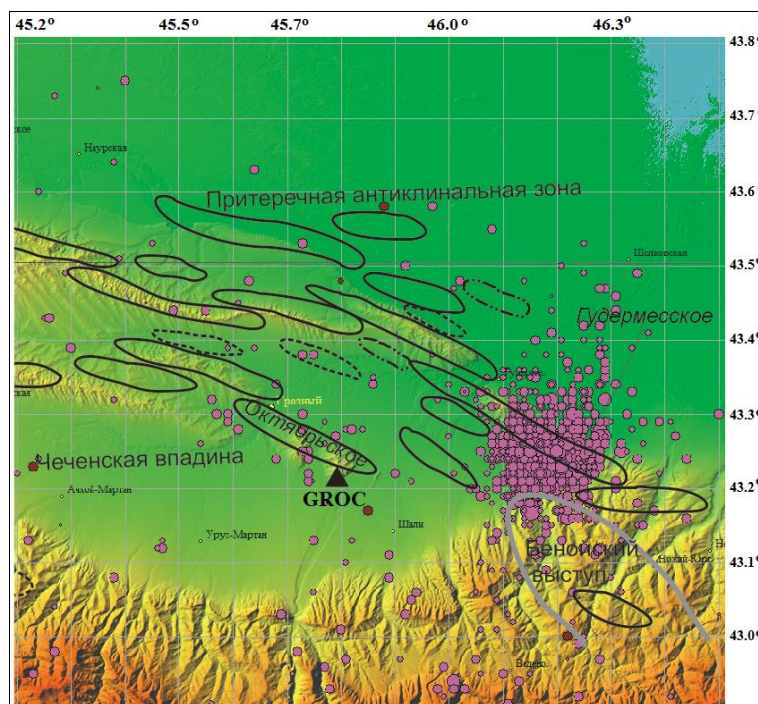


Рис. 3. Положение поля афтершоков Курчалойского землетрясения на фоне схемы основных месторождений Терско-Сунженского нефтегазоносного района по [7]

Курчалойское землетрясение 11 октября 2008 г. зарегистрировано многими зарубежными сейсмическими сетями, его параметры получены различными агентствами и опубликованы к моменту написания статьи на сайте Международного сейсмологического центра ISC (табл. 1, рис. 4). Получен довольно большой разброс решений, который по положению эпицентра достигает $\delta=30$ км. Наиболее близки к макросейсмическому эпицентру ($\delta=7$ км) эпицентры Северного Кавказа (NC) и Бюллетеня Международного центра данных Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (REB IDC) ($\delta=13$ км). Решения всех остальных центров (MOS, ENB, ISC, NEIC, CSEM) лежат довольно кучно примерно на 25–35 км север-северо-восточнее макросейсмического эпицентра (рис. 4).

Таблица 1. Основные параметры Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с $M_w=5.8$ по данным Северного Кавказа (NC) в сопоставлении с определениями других агентств

| Агентство | t_0 , ч мин с | δt_0 , с | Гипоцентр | | | | | | Магнитуда | Источ- ник |
|-----------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-------------|--------------------|--|---------------|
| | | | φ°, N | $\delta\varphi^\circ$ | λ°, E | $\delta\lambda^\circ$ | h , км | δh , км | | |
| NC | 09 06 09.8 | 0.60 | 43.24 | 0.08 | 46.17 | 0.08 | 15 | 5 | $K_p=14.5$, $MPVA=5.6/8$ | [9] |
| MOS | 09 06 09.0 | 1.63 | 43.46 | 0.04 | 46.34 | 0.03 | 14 | | $MS=5.6/74$, $MPSP=5.7/123$ | [10] |
| ЕНВ | 09 06 10.6 | 1.1 | 43.366 | 0.02 | 46.295 | 0.01 | 16 | | | [11] |
| ISC | 09 06 10.4 | 0.3 | 43.4213 | 0.02 | 46.3368 | 0.01 | 11.6 16* | 2.0* | $M_s=5.0/50$, $m_b=5.6/468$, $h_{rp}=16\pm 2.0$ | [11] |
| NEIC | 09 06 10.8 | 0.11 | 43.372 | 0.03 | 46.254 | 0.02 | 16f | | $M_s=5.5/188$, $m_b=5.6/292$, $M_w=5.7$ | [11] |
| GСMT | 09 06 15.9 | 0.2 | 43.40 | | 46.19 | | 13 | | $M_w=5.8$ | [11] |
| REB IDC | 09 06 07.5 | 0.34 | 43.2087 | 0.09 | 46.2883 | 0.07 | 0f | | $MS=5.5/37$, $m_b=5.3/36$, $ML=4.8/4$ | [11] |
| CSEM | 09 06 09.8 | 0.05 | 43.4225 | 0.02 | 46.3062 | 0.02 | 10 | | $m_b=5.7/99$, $MS=5.5$, $M_w=5.6$ | [11] |

Примечание. * – h по фазе pP ; расшифровка кодов агентств дана в условных обозначениях к наст. сб.

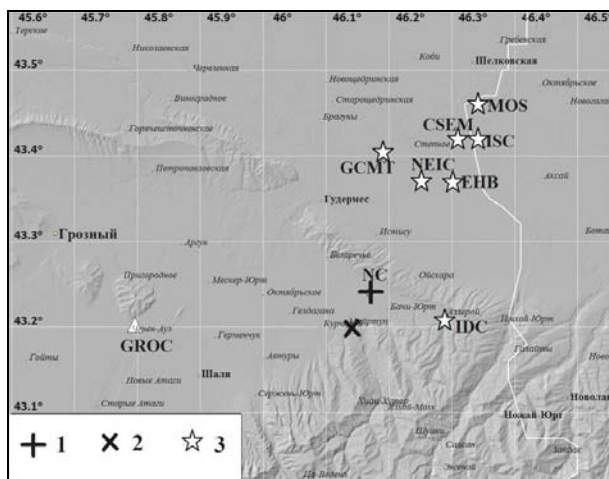


Рис. 4. Положение эпицентра основного толчка Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. по данным различных центров и макросейсмического эпицентра по [1]

- 1, 2 – инструментальный и макросейсмический эпицентр;
3 – эпицентры других центров согласно табл. 1.

от эпицентрального расстояния и азимута отдельно для региональных (рис. 5) и телесейсмических (рис. 6) расстояний.

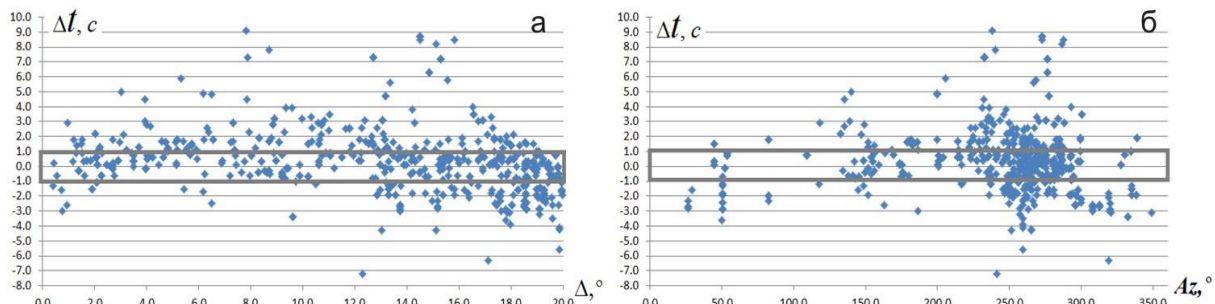


Рис. 5. Распределение временных невязок, полученных по данным ISC при локации на региональных расстояниях по расстоянию (а) и азимуту (б)

Контуром выделена область нормальных ($\delta=\pm 1$ с) временных отклонений.

На всех расстояниях значения невязок более ± 3 с могут быть связаны с особенностью записи этого землетрясения, имеющего нечеткие первые вступления P -волны на многих станциях, что особенно затрудняет автоматическое выделение первой фазы. Именно так, например, получены отрицательные отклонения $\delta t = -(1-4)$ с в группе станций «Боровое» (BRVK) с $Az \approx 50^\circ$ (рис. 5 б). А вот на телесеismicических расстояниях подобные отклонения имеют станции Австралии и Индонезии (овал 1 на рис. 6 б). Компактно расположены станции африканских государств с отрицательными невязками $\delta t = -(1-3)$ с (овал 2 на рис. 6 б). Большое число станций в азимутах $Az = 270-360^\circ$, участвующих в определении координат гипоцентра Курчалойского землетрясения, расположены на территории Европы (рис. 6), но только часть из них имеют $\delta t > 1$ с (овал 3 на рис. 6 б). Это в основном станции, расположенные на территории Италии.

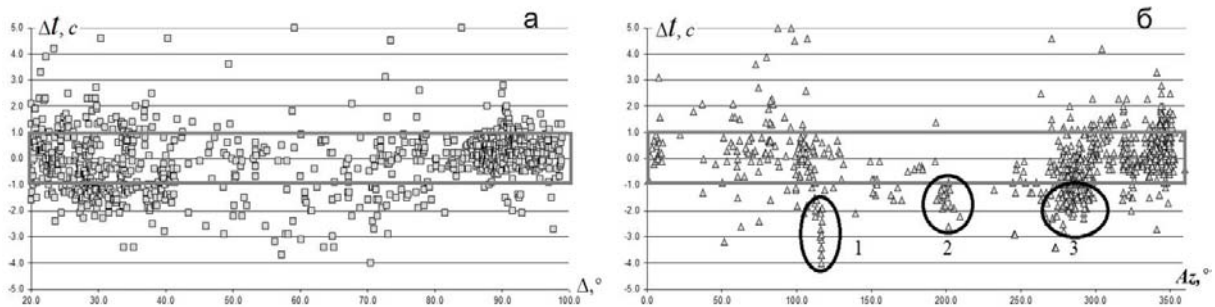


Рис. 6. Распределение временных невязок, полученных по данным ISC при локации на телесеismicических расстояниях по расстоянию (а) и азимуту (б)

Контуром выделена область нормальных ($\delta = \pm 1$ с) временных отклонений; овалом выделены станции Индонезии и Австралии (1), стран Африки (2), части станций Германии, Италии и Австрии (3).

Итак, установленные различия в невязках могут быть объяснены двумя факторами: неточное автоматическое обнаружение фаз и несоответствие реальных скоростей распространения волн и, соответственно, времен пробега P -волн скоростной модели IASPEI-91 [15], АК135 [16], особенно на региональных расстояниях.

Систематическое отклонение эпицентра на северо-восток от макросейсмического эпицентра связано, скорее всего, с неравномерным расположением станций относительно эпицентра исследуемого землетрясения, о чем говорят значительные азимутальные бреши как на региональных, так и на телесеismicических расстояниях (рис. 5 и 6). Налицо значительная «скученность» станций в определенных азимутах ($Az = 270-360^\circ$) за счет участия большого числа европейских станций. Подобная ситуация наблюдалась при Калининградских землетрясениях 21.09.2003 г. [17]. Следует отметить, что при локации в ISC были использованы по несколько вступлений P -волны на одной и той же станции, полученные в разных центрах и, кстати, различающиеся иногда на 1 с и более. Это привело к уменьшению статистических оценок: большая и малая оси эллипса ошибок равны $S_{\text{maj}} = 1.805$ км, $S_{\text{min}} = 1.175$ км соответственно. Однако это не решило проблему устойчивости решения, т.к. еще более усилило влияние станций в узком азимутальном створе.

Механизм очага основного толчка Курчалойского землетрясения и 18 его афтершоков, произошедших в первые три дня, были рассчитаны по знакам первых вступлений P -волн [18]. Для расчета использовалась программа А.В. Ландера [19, 20]. При этом был осуществлен контроль правильности решения по знакам первого движения только на региональных станциях. Затем было проведено сравнение таких решений для основного толчка и сильнейшего афтершока с решениями по методу тензора момента центроида в центрах США – Global CMT Catalog и NEIC. В результате получено хорошее совпадение, что послужило основанием построения механизмов по P -волнам для более слабых афтершоков. Параметры механизмов приведены в наст. сб. [18], а решения показаны ниже в виде стереограмм в нижней полусфере.

Решение механизма очага в стереографической проекции на нижней полусфере показано на рис. 7. Решения трех центров OBN, GCMT и NEIC, размещенные внизу рис. 10, близки. Тип движения по обеим плоскостям в решении GCMT – почти чистый взброс с небольшими

компонентами сдвига (по $NP1$ – правостороннего, по $NP2$ – левостороннего). Нодальные плоскости простираются широтно с запада на восток ($NP1$) и с востока на запад ($NP2$). Угол падения плоскостей во всех решениях довольно крутой ($DP_{NP1}=51^\circ$, $DP_{NP2}=42^\circ$). Движение в очаге произошло под действием горизонтальных сил сжатия, направленных в меридиональном направлении с севера.

Наложение диаграмм двух сильнейших землетрясений (по данным GСMT) – основного толчка в 09^h06^m и сильнейшего афтершока в 09^h21^m – показывает идентичность типа движения и действующих в очаге сил (рис. 7). Подобного типа механизм имела значительная часть афтершоков в течение первых трех суток (рис. 8 а, б). Однако почти чистый взброс уже сменился на взброс со сдвиговой компонентой, в решении механизма очага все больше проявляется сдвиговая составляющая.

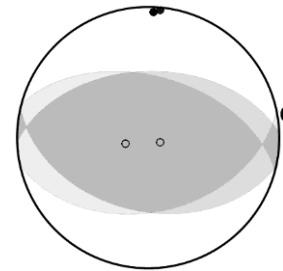


Рис. 7. Наложение диаграмм двух сильнейших землетрясений – основного толчка в 09^h06^m с $K_p=14.5$ и сильнейшего афтершока в 09^h21^m с $K_p=13.2$ [2]

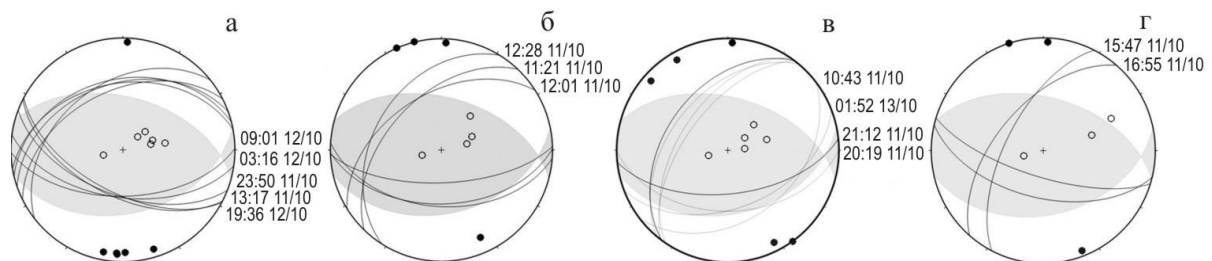


Рис. 8. Сравнение с решением GСMT для главного толчка (область сжатия показана серым цветом) диаграмм механизмов очагов для следующих землетрясений:
а) 11.10.2008 г. в 13^h17^m , 23^h50^m ; 12.10.2008 03^h16^m , 09^h01^m , 19^h36^m ;
б) 11.10.2008 г. в 11^h21^m , 19^h01^m и 12^h28^m ;
в) 11.10.2008 г. в 10^h43^m , 20^h19^m , 21^h12^m и 13.10.2008 г. в 01^h52^m ;
г) 11.10.2008 г. в 15^h47^m и 16^h55^m .

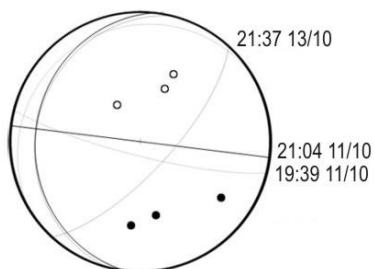


Рис. 9. Диаграммы механизмов очагов трех землетрясений, в решении которых получен надвиг по одной из плоскостей:
11 октября в 19^h39^m , 21^h04^m
и 13 октября в 21^h37^m

Основное движение в главном толчке связано с нодальной плоскостью широтной ориентации ($STR=285^\circ$ по GСMT).

Близкое направление можно увидеть и на азимутальном годографе (рис. 11), построенном по методике И.В. Горбуновой [23], разработанной из представления о протяженном движущемся источнике излучения. Практическое использование данной методики заключается в интерпретации азимутального распределения времен (τ , c) запаздывания прихода максимума в P -волне относительно первого вступления $\tau = t_{P_{max}} - t(P) = f(Az)$.

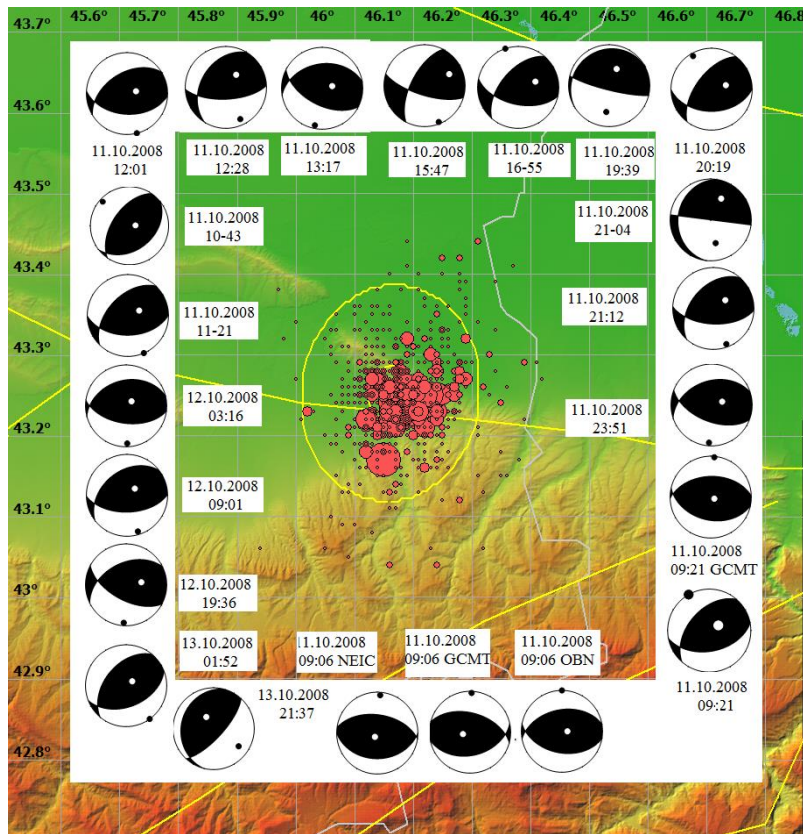


Рис. 10. Решения механизмов очагов основного толчка и сильнейших афтершоков Курчалойского землетрясения

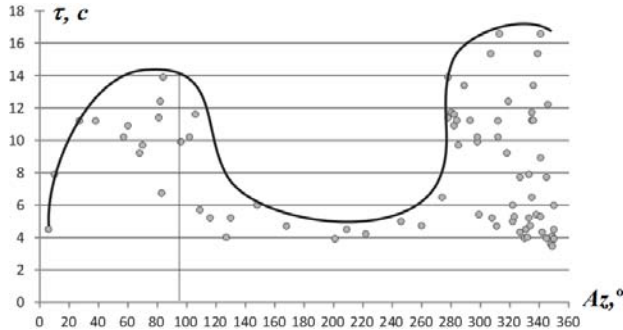


Рис. 11. Азимутальное распределение τ от Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г.

Азимутальный годограф Курчалойского землетрясения имеет два максимума, что соответствует более сложному очаговому процессу, нежели простой односторонний разрыв. В [23] похожие типы азимутальных годографов были получены для землетрясений Северного Тянь-Шаня, произошедших также в условиях горизонтального сжатия, как и исследуемое Курчалойское землетрясение. Первый из максимумов зафиксирован на $Az=95^\circ$, что соответствует, согласно методике, противоположному направлению распространения разрыва, т.е. направление распространения разрыва равно $95^\circ+180^\circ=275^\circ$. Это соответствует среднему значению из $STR=259-278-285^\circ$, полученному по данным центров OBN, NEIC, GCMТ для главного толчка. Используя формулы из [24], получим длину разрыва L и скорость его распространения:

$$L = \frac{v_p}{2} (\tau_{\max} - \tau_{\min}),$$

где v_p – скорость распространения продольной волны (в нашем случае – средняя скорость $v_p=4.8$ км/с в Терско-Каспийском прогибе в верхней части земной коры),

$$c = v_p \left(\frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\tau_{\max} + \tau_{\min}} \right),$$

где c – скорость распространения разрыва, равная 2.67 ± 0.1 км/с (табл. 2), в широтном направлении.

Таблица 2. Параметры разрывообразования в очаге Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. в 09^h06^m с $M_w=5.8$

| $Az, ^\circ$ | $\delta Az, ^\circ$ | $L, км$ | $\delta L, км$ | $c, км/с$ | $\delta c, км/с$ |
|--------------|---------------------|---------|----------------|-----------|------------------|
| 95 | 15 | 24 | 0.5 | 2.67 | 0.1 |

Полученное значение длины разрыва $L=24 км$ находится в хорошем согласии с размерами облака афтершоков (широтная ось – 21 км, в направлении на северо-восток – 25 км). Отметим, однако, что значение $L=24 км$ в табл. 2 несколько больше оценки L по спектральному анализу записей весьма удаленной станции «Талая» в [25], равной 16 км.

Афтершоки Курчалойского землетрясения в 2008 г. включают 1003 события с $K_p=6.2-13.2$ [2], представительными из которых являются землетрясения с $K_p \geq 7.6$. Фрагмент развития процесса афтершоков в первые сутки с 09^h06^m 11 октября до 09^h07^m 12 октября развернут на рис. 12 (по вертикали даны значения их классов K_p). Сильнейший афтершок с $K_p=13.2$ произошел всего через 15^m после основного толчка. Энергетическая ступень невысока и составила $\Delta K_p=1.3$.

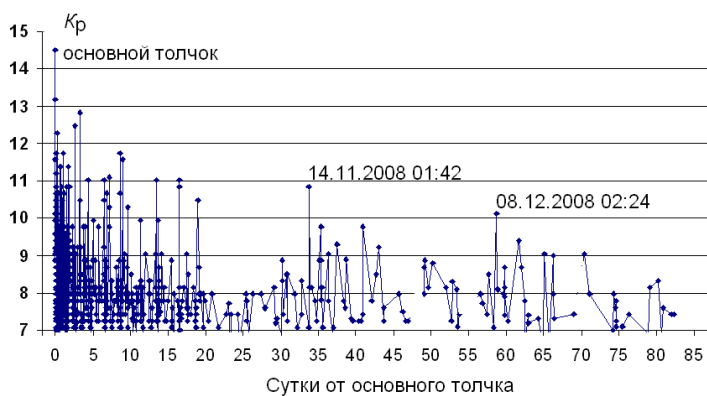


Рис. 12. Последовательные во времени афтершоки Курчалойского землетрясения 11 октября в 09^h06^m с $K_p=14.5$ за одни сутки после него ($N=368$)

Точность локации. Очень важно более точно определить координаты гипоцентров афтершоков для получения правильной геометрии очаговой зоны Курчалойского землетрясения. Для уточнения параметров координат гипоцентров афтершоков была применена программа huroDD, реализующая метод двойных разностей [5, 6]. По площади афтершоки расположились в достаточно компактном «облаке» (рис. 13). Диапазон погрешностей по широте, долготе и глубине, полученной в huroDD, показан на рис. 14. Подавляющая их часть не превышает 5 км.

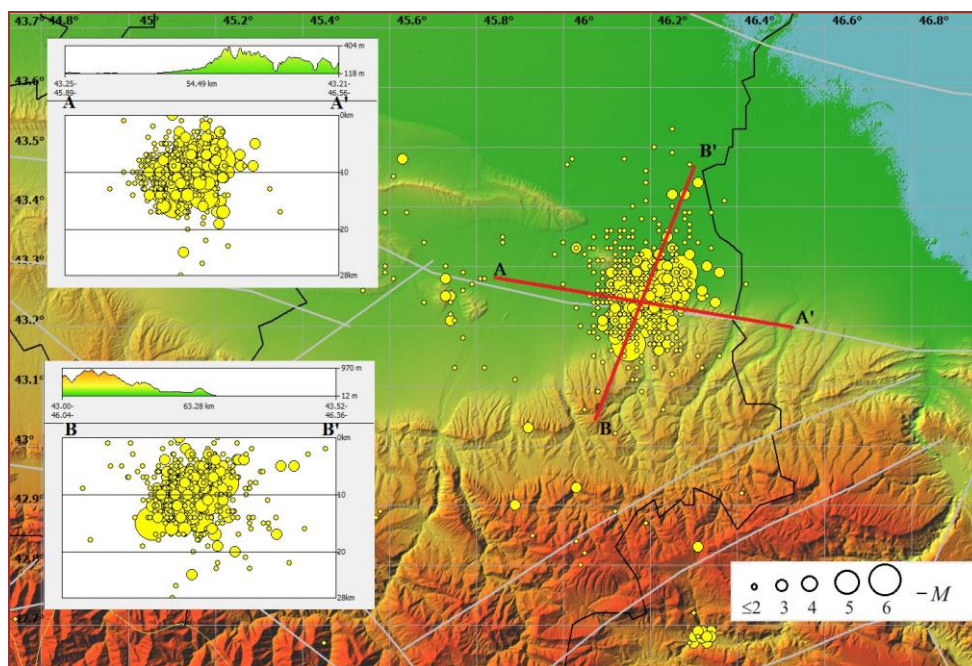


Рис. 13. Положение облака афтершоков и глубинные разрезы по линиям AA' и BB' (использована программа [26])

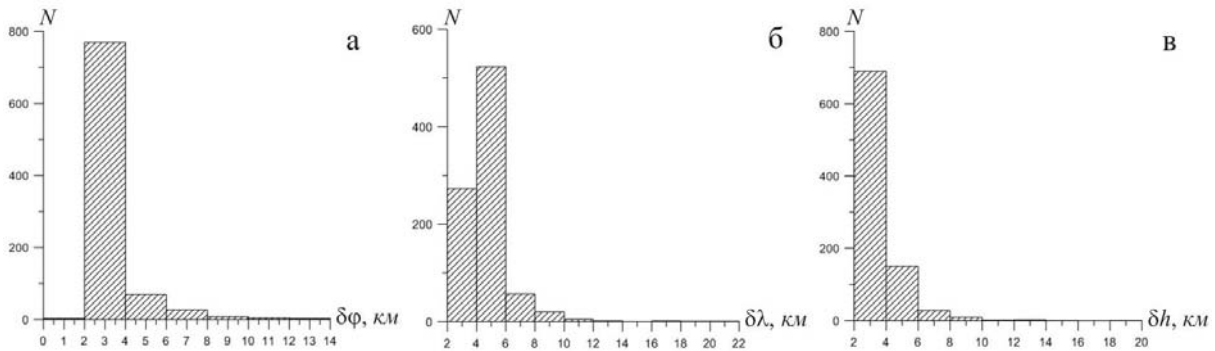


Рис. 14. Распределение ошибок вычисления координат гипоцентров афтершоков в км:
а – по широте, б – по долготе; в – по глубине

Затухание афтершоков во времени показано на рис. 15 в принятой в [27] билогарифмической системе координат $\lg N = f(\lg t)$. Процесс разделен на две стадии. В первой наблюдается монотонный спад активности афтершоков за период $T=19$ суток при коэффициенте затухания $p=1.20 \pm 0.09$, после чего процесс переходит в нерегулярную стадию длительностью свыше года. В нерегулярной стадии в очаговой области уже в 2009 г. отмечено два факта повышения сейсмического уровня: второй пик наблюдается на 220–221-й день (17–18.05.2009 г.) после основного толчка, третий – на 405-й день. При этом в связи с последовательным затуханием процесса последующие пики меньше, чем предыдущие. В результате кривая высвобождения упругой деформации (рис. 16) практически не имеет ступеней.

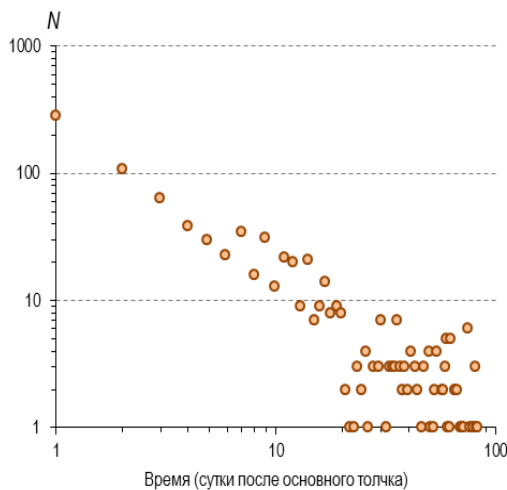


Рис. 15. Спад во времени представительных ($K_r \geq 7.6$) афтершоков Курчалойского землетрясения

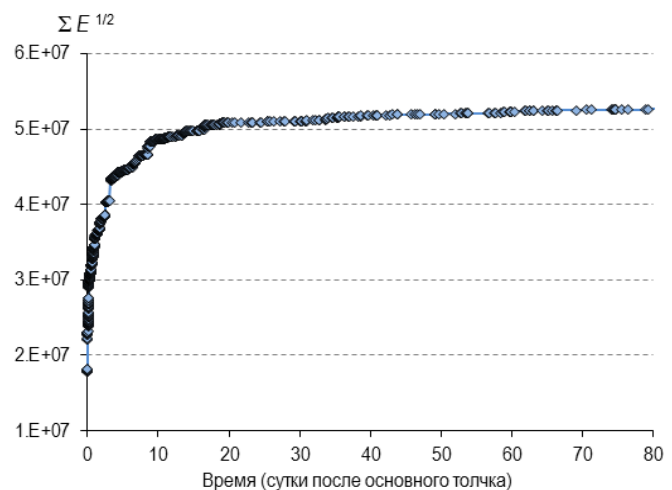


Рис. 16. График высвобождения упругой деформации ($\sim \Sigma \sqrt{E}$) серии афтершоков, включая основной толчок

Наклон γ графика повторяемости $N(K_r)$ оценивался для представительных ($K_r \geq 7.6$) афтершоков Курчалойского землетрясения, общее число которых равно $N=600$. Расчет его параметров методом ортогональной регрессии привел к следующим результатам:

$$\lg N(K) = (2.24 \pm 0.10) - (0.44 \pm 0.02) K \quad (1)$$

при коэффициенте корреляции $r=0.996$. Аналогичный расчет для всех ($N=1293$) коровых землетрясений Чеченско-Дагестанской зоны ($\varphi=42-44^\circ\text{N}$, $\lambda=45-47^\circ\text{E}$) за 2000–2007 гг. при коэффициенте корреляции $r=0.96$ имеет вид:

$$\lg N(K) = (5.62 \pm 0.28) - (0.48 \pm 0.02) K. \quad (2)$$

Сравнение их наклонов показывает для афтершоков меньшее значение, чем среднее $\gamma=0.48$ для всего района. Для объяснения этого явления рассмотрим характер изменения γ_{aft}

для выборок землетрясений с различной глубиной гипоцентров, как это было сделано в [28]. Разобьем весь массив афтершоков на выборки по глубинам $h < 10$ км ($N=397$), $h=10-15$ км ($N=520$) и $h \geq 16$ км ($N=86$). Получим следующие результаты и $\gamma_{\text{афт}}$ (рис. 17):

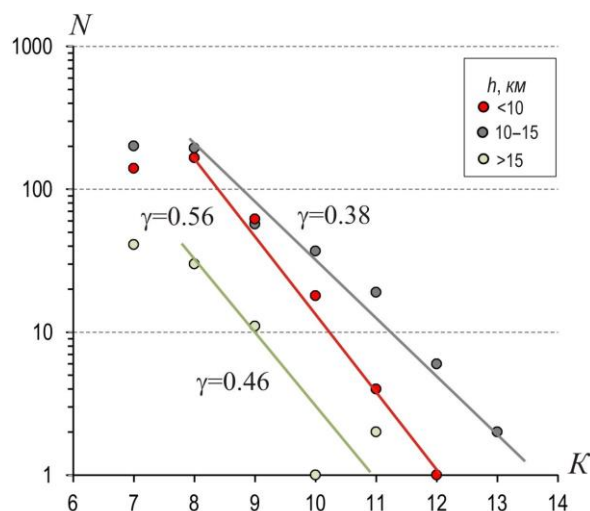


Рис. 17. Графики повторяемости афтершоков Курчалойского землетрясения для разных глубин

$$\lg N(K) = (1.77 \pm 0.08) - (0.56 \pm 0.02) K$$

($r=0.997$) при $h < 10$ км,

$$\lg N(K) = (2.61 \pm 0.18) - (0.38 \pm 0.03) K$$

($r=0.99$) – $h=10-15$ км,

$$\lg N(K) = (1.67 \pm 0.66) - (0.46 \pm 0.18) K$$

($r=0.87$) – $h \geq 16$ км.

Таким образом, для основного числа землетрясений в близповерхностной части разреза характерно преобладание слабых землетрясений относительно числа сильных, в интервале глубин 10–15 км, напротив, происходят более сильные землетрясения. Землетрясения на глубинах более 15 км менее представительны, однако наклон γ близок к среднему для этого района в целом до землетрясения. Уменьшение γ с глубиной было замечено и на данных афтершоков Дагестанского землетрясения [28].

Сейсмическая обстановка перед землетрясением. Известно, что при подготовке сильных землетрясений в процесс вовлекаются значительные объемы литосферы, блоки земной коры, которые, взаимодействуя, изменяют ход геодинамических процессов [29]. Это находит отражение в пространственно-временном распределении слабой сейсмичности в области готовящегося землетрясения.

Кроме того, исследование проявлений сильнейших землетрясений Восточного Кавказа с точки зрения геодинамики указывает на существование динамического взаимодействия между структурами верхних и нижних частей земной коры и, возможно, верхов мантии [30]. По-видимому, такое взаимодействие прослеживается в Терско-Сунженской зоне и для менее значительных по магнитуде землетрясений.

Как было показано в [14], перед Курчалойским землетрясением 11 октября 2008 г. в Терско-Сунженской сейсмогенной зоне были заметны некоторые особенности, имевшие место и перед другими землетрясениями в этой зоне:

- сопоставление энергии, выделившейся при коровых и глубоких очагах землетрясений во времени (в период 1972–2008 гг.), показало, что по уровню энергий $E \geq 1.0 \cdot 10^{12}$ Дж периоды активизации сменяются (в противофазах) периодами затишья как коровых, так и глубоких землетрясений, которые составляют от 13 до 19 лет;

- наблюдалась активизация глубоких очагов примерно за четыре года до сильного корового землетрясения. Это явление было отмечено в период подготовки двух наиболее сильных землетрясений в Терско-Сунженской сейсмогенной зоне: Черногорского – 28 июля 1976 г. с $K_p=15$, $MLH=6.2-6.4$, $I_0=8-9$ баллов [31, 32] и описываемого в наст ст. Курчалойского – 11 октября 2008 г. с $K_p=14.5$, $MS=Ms=5.6$, $M_w=6.0$, $I_0=7-8$ баллов [9];

- в течение примерно года наблюдается всплывание очагов с глубин $h=100-120$ км к границе Мохо (~60 км) с приближением к будущему очагу Курчалойского землетрясения. Как отмечалось в [33], 22.10.2007 г. в $20^h 10^m$ в районе эпицентра будущего очага произошло землетрясение с $K_p=10.8$ с промежуточной глубиной $h=110$ км, на близкой глубине $h=98$ км здесь же зафиксирован очаг землетрясения 05.05.2008 г. в $23^h 20^m$ с $K_p=8.2$ и 22.08.2008 г. в $07^h 21^m$ с $K_p=7.8$ на глубине $h=64$ км. Таким образом наблюдается всплывание очагов;

- коровые очаги центрального участка Терско-Каспийского прогиба концентрируются в местах пересечения глубинных разломов. Значительная их часть образует рои, которые происходят в земной коре на глубинах не более 20 км. В период 2001–2008 гг. в поведении сла-

бых землетрясений в земной коре заметны элементы подготовки сильного землетрясения, а именно миграция слабых землетрясений вдоль диагонального направления с периферийных участков Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области в направлении с северо-запада на юго-восток, «затишье» в области радиусом 50 км вокруг эпицентра будущего землетрясения в течение четырех месяцев (рис. 18).



Рис. 18. Развертка во времени событий разных классов в течение 300 суток до Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. и 400 – после него в его очаге

На территории с координатами $\varphi=42.5-43.7^{\circ}\text{N}$, $\lambda=45-47.3^{\circ}\text{E}$, окружающей эпицентр Курчалойского землетрясения радиусом примерно 80 км, в начале 2008 г. отмечалось некоторое повышение активности, происходили относительно сильные землетрясения – 9 марта 2008 г. в $07^{\text{h}}25^{\text{m}}$ с $K=9.6$; 21 марта в $23^{\text{h}}34^{\text{m}}$ с $K=10.0$; 31 марта в $20^{\text{h}}17^{\text{m}}$ с $K=11.6$ практически в очаговой зоне Курчалойского землетрясения с интенсивностью сотрясений $I=4$ балла в Бачи-Юрте, 3–4 балла – в Гудермесе, 2–3 балла – в Махачкале. После относительного затишья произошло землетрясение 23 августа в $07^{\text{h}}29^{\text{m}}$ с $K=11.0$ в 50 км восточнее будущего эпицентра, а 2 октября в $20^{\text{h}}02^{\text{m}}$ с $K=11.6$ – в 50 км южнее, которое ощущалось в Ботлихе (Республика Дагестан) с $I=3-4$ балла (рис. 19).

После относительного затишья произошло землетрясение 23 августа в $07^{\text{h}}29^{\text{m}}$ с $K=11.0$ в 50 км восточнее будущего эпицентра, а 2 октября в $20^{\text{h}}02^{\text{m}}$ с $K=11.6$ – в 50 км южнее, которое ощущалось в Ботлихе (Республика Дагестан) с $I=3-4$ балла (рис. 19).

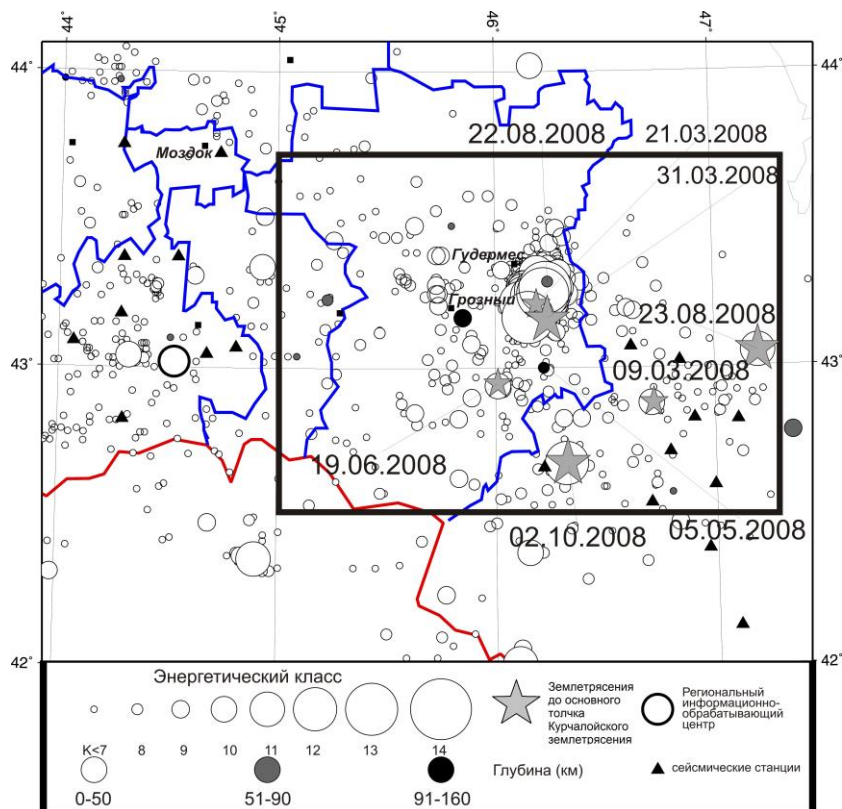


Рис. 19. Карта эпицентров землетрясений Терско-Сунженского района в 2008 г.

Тектоническая обстановка района Курчалойского землетрясения. Эпицентр землетрясения относится к Терскому хребту Терско-Каспийского передового прогиба. Сеймотектоническая позиция очага этого землетрясения определяется приуроченностью его к одному из сейсмоактивных блоков, границами которого являются: с севера – субширотный региональный глубинный Срединный и диагональный Гудермесско-Моздокский разломы; с юга – субширотный региональный глубинный Пшекиш-Тырныауз-Аргудан-Сунженский и диагональный

Бенойско-Эльдаровский разломы; с запада и востока, соответственно, поперечные разломы – Аргунский и Аксайский (рис. 20).

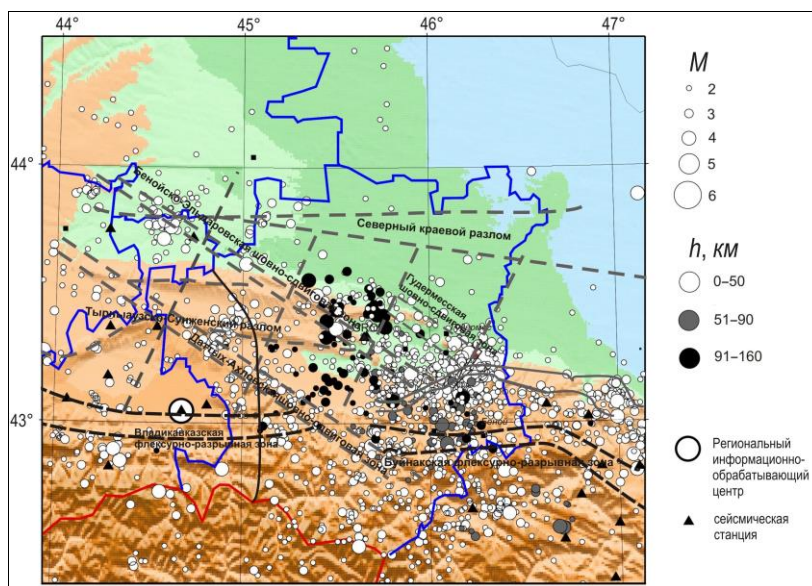


Рис. 20. Карта эпицентров землетрясений 2000–2011 гг. на фоне основных структурных элементов по «Схеме сейсмогенерирующих структур Чеченской Республики и сопредельных территорий» из [34]

1 – Северный краевой погребенный разлом (северная ветвь); 2 – Северный краевой погребенный разлом (южная ветвь); 3 – частично погребенные сбросы антикавказской ориентировки; 4 – Гудермесская погребенная шовно-сдвиговая зона; 5 – Бенойско-Эльдаровская погребенная шовно-сдвиговая зона; 6 – Тырнаузско-Сунженский погребенный глубинный разлом; 7 – Даттых-Ахловская погребенная шовно-сдвиговая зона; 8 – Владикавказская флексурно-разрывная зона; 9 – Буйнакская флексурно-разрывная зона; 10 – Хасавюртская флексурно-разрывная зона; 11 – Цхинвало-Казбекский линеймент неясной природы.

При комплексной оценке сейсмической опасности территории Чеченской Республики [34] выделены четыре зоны возможных ожидаемых землетрясений (ВОЗ) на территории Чеченской Республики: Северная краевая ($M_{\max}=5.5-6.0$, с разрывным сбросовым типом), Гудермесская ($M_{\max}=5.5$, шовно-сдвиговая, погребенная), Бенойско-Эльдаровская ($M_{\max}=5.5-6.0$, шовно-сдвиговая, погребенная) и Даттых-Ахловская ($M_{\max}=6.0$, шовно-сдвиговая, погребенная). В пределах них выделяются также структурные узлы: Наурский в Северной краевой ВОЗ, Грозненский – в Бенойско-Эльдаровской ВОЗ, Черногорский – в Даттых-Ахловской ВОЗ. Основные деформации в них осуществляются на уровне палеозойского фундамента и глубже.

Другой вариант зон ВОЗ создан Е.А. Рогожиным [22] на основе генерализации материалов «Геологической и тектонической карт Северного Кавказа» (1999), а также интерпретации данных дистанционных зондирований. Здесь выделяются шесть зон ВОЗ, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Зоны ВОЗ и их характеристики для территории Чеченской Республики по Е.А. Рогожину [22]

| № на карте | Зона ВОЗ | M_{\max} | h , км | Кинематика |
|------------|--------------------------|------------|----------|---------------|
| 1 | Нижнетерская | 4.0 | 5 | взброс |
| 2 | Терская западная | 4.7 | 5 | взброс |
| 3 | Терская восточная | 5.3 | 10 | взброс |
| 4 | Гудермесская западная | 6.1 | 15 | взбросо-сдвиг |
| 5 | Гудермесская восточная | 6.3 | 15 | взбросо-сдвиг |
| 6 | Грозненская (Сунженская) | 5.2 | 10 | взброс |

Помимо геологических критериев сейсмичности, на выделение зон ВОЗ в Терско-Сунженской зоне влияют техногенные факторы, связанные с технологическими процессами при разработке нефтегазовых месторождений, приуроченных к антиклинальным структурам [35].

Коллекторы нефти и газа подобно твердому телу деформируются под действием приложенных к ним напряжений и температур. Нормальные напряжения вызывают сжатие или растяжение тела, а касательные – сдвиг или срез. В залежи ведется закачка, сброс флюидов, газа, что может вызвать повышение пластовых давлений, а это приводит к понижению вязкости, прочности, сопротивлению пород сдвигу. Порода может не деформироваться пластично, а раскалываться, т.е. произойдет деформация типа сдвиг, характерная для землетрясений. Вторичные методы эксплуатации могут спровоцировать тектонически подготовленное землетрясение. Доказано, что так были спровоцированы тектонически подготовленные Гудермесские 1950 г. и 1955 г. и Старогрозненские – 1938 г. и 1971 г. землетрясения [35].

Однако в начале двухтысячных годов объемы добычи невелики и, несмотря на то, что основной толчок и поле афтершоков лежат вблизи Гудермесского и Мескетинского месторождений нефти и газа, возможное провоцирование землетрясения добычей не подтверждается фактическими данными. По сообщению начальника станции «Грозный» М.Я. Гайсумова, на Гудермесском месторождении (Восточный блок) в 2008 г. проводилась незначительная добыча (порядка 10000–20000 *т/год*) из карагано-чокракских отложений нефти на глубинах порядка 1500–2500 *м*. Непосредственно над очагом землетрясения 2008 г. находится Мескетинское месторождение, где залежь из меловых отложений на глубине 5300–5500 *м* эксплуатировалась до 2002 г., а в 2003 г. скважины были законсервированы.

В [21] отмечается, что Гудермесское месторождение приурочено к антиклинальной складке, расцеленной крупными продольными разрывами, проходящими по северному и южному крылу складки. Кроме этого отмечено несколько продольных смещений, пересекающих антиклиналь на ряд продольных пластин и поперечных разрывов северо-восточного простирания, являющихся поверхностным выражением Аксайского разлома. По данным изучения современных вертикальных движений земной поверхности в пределах Гудермесской структуры выявлены две зоны высокоградиентных изменений вертикальных движений: над северным ограничением – узкая зона, шириной до 1 *км* с амплитудой вертикальных движений до 10 *мм* и величиной градиента до 16 *мм/км* и зона на южном ограничении структуры шириной 5 *км* с величиной градиента до 20 *мм/км*.

Таким образом, можно полагать, что исследуемое землетрясение имеет чисто тектоническую природу.

История сейсмичности. По имеющимся сведениям Терско-Сунженская сейсмогенерирующая область высокосейсмична (рис. 21).

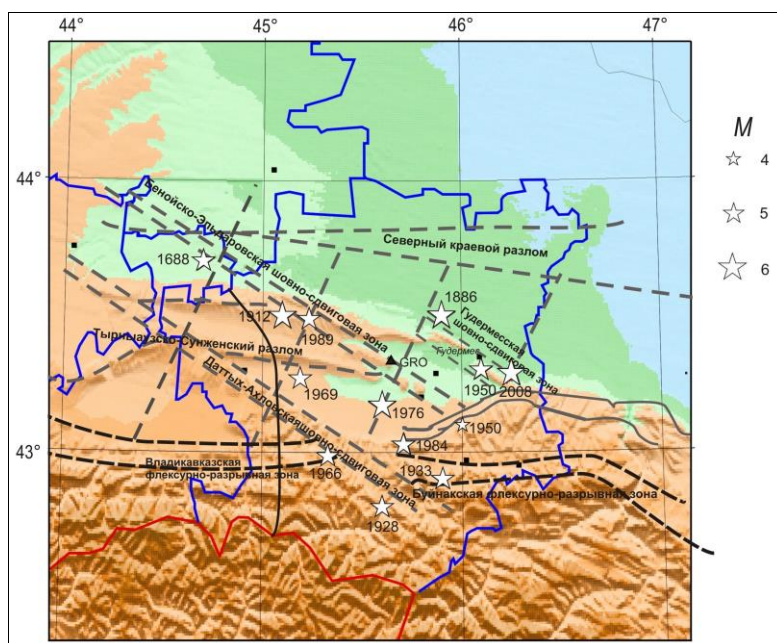


Рис. 21. Карта эпицентров сильнейших землетрясений центральной части Терско-Каспийского прогиба на фоне основных структурных элементов по «Схеме сейсмогенерирующих структур Чеченской Республики и сопредельных территорий» [34]

В 1976 г. здесь произошло Черногорское землетрясение с $M=6.4$, $I_0=8-9$ баллов [32], а с конца XIX в. до начала XXI в. известно более 20 землетрясений, проявившихся с интенсивностью сотрясений $I_0 \geq 6$ баллов. Согласно [36], к наиболее сильным из них относятся 8-балльное Терское (Эльдаровское) землетрясение 10.08.1912 г. с $M=5.7$ и очагом в переходной к верхней мантии зоне; 7-8-балльное Веденовское 24.10.1933 г. с $M=5.2$; несколько 7-балльных землетрясений: 23.02.1785 г. – Дагестанское-I с $M=5.5$; 16.10.1886 г.; 05.10.1928 г. – Аргунское-I с $M=4.7$; 02.03.1966 г. – Аргунское-II с $M=4.9$; 17.06.1969 г. – Ачхой-Мартановское с $M=5.1$; 26.05.1971 г. – Старогрозненское с $M=4.1$; 23.12.1974 г. – Салатаусское с $M=5.0$. Черногорское землетрясение 28.07.1976 г. с $M=6.4$ сопровождалось многочисленными афтершоками [32]; 4 марта 1984 г. практически в этой же эпицентральной зоне с разницей в девять часов ($t_{01}=10^h01^m$, $t_{02}=19^h24^m$) произошли два землетрясения с интенсивностью 6–7 баллов и $M=5.2$ и 5.3 соответственно [37], за которыми также последовали многочисленные повторные толчки. После этих землетрясений наиболее значительными были толчки меньшего энергетического уровня и удаленные примерно на 100 км к западу и востоку от эпицентра 11 октября: 3 августа 1989 г. с $M=5.0$ [38], 31 января 1999 г. с $M=5.1$ [39], 12 октября 2006 г. с $M=4.5$ [40] с очагом в верхней мантии. Ближайшие к очагу Курчалойского землетрясения ощутимые землетрясения произошли 31 марта 1950 г. – Гудермесское-I с $M=4.2$, $I_0=6-7$ баллов; 9 ноября 1950 г. – Гудермесское-II с $M=5.0$, $I_0=6$ баллов [35].

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00158).

Л и т е р а т у р а

1. Асманов Ю.А., Левкович Р.А., Гайсумов М.Я., Керимов И.А., Габсатарова И.П., Головкова Л.В., Иванова Л.Е., Пономарёва Н.Л., Чепкунас Л.С., Рыжикова М.И. Макросейсмические проявления Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с $K_p=14.5$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$ (Чеченская Республика). (См. раздел III (Сильные и ощутимые землетрясения) в наст. сб.).
2. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Головкова Л.В., Асманов О.А., Девяткина Л.В. (отв. Сост.), Александрова Л.И., Иванова Л.Е., Малянова Л.С., Амиров С.Р., Мусалаева З.А., Сагателова Е.Ю., Гамидова А.М., Абдуллаева А.Р., Калоева И.Ю., Киселёва О.А., Перевозников К.А., Цирихова Г.В. Афтершоки Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. за 2008 г. ($N=1003$) за 2008 г.. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
3. Цифровая сейсмическая станция SDAS. Описание и инструкция по эксплуатации. – Обнинск: ЦОМЭ ГС РАН, 2004. – 94 с.
4. Технический паспорт сейсмической станции «Грозный» типа UGRA. – Обнинск. Фонды ГС РАН, 2008. – 5 с.
5. Waldhauser F. and Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California // Bull. Seism. Soc. Am. – 2000. – 90. – N 6. – P. 1353–1368.
6. Waldhauser F. HypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations // U.S. Geol. Survey. Open File Report 01-113. – 2001. – 25 p.
7. Хамидов Б.Х. Анализ современного состояния и перспективы развития нефтедобычи на территории деятельности ОАО «Грознефтегаз» // Геология нефти и газа. – 2007. – № 5. – Электронный ресурс. – URL: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/492/77/>.
8. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Головкова Л.В. Северный Кавказ. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
9. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Головкова Л.В., Асманов О.А., Девяткина Л.В. (отв. сост.), Александрова Л.И., Иванова Л.Е., Малянова Л.С., Амиров С.Р., Лещук Н.М., Мусалаева З.А., Сагателова Е.Ю., Гамидова А.М., Абдуллаева А.Р., Калоева И.Ю., Киселёва О.А., Перевозников К.А., Цирихова Г.В. Каталог землетрясений ($N=1937$) и взрывов ($N=31$) Северного Кавказа в государственных границах +30 км за 2008 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
10. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2008 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2008–2009. – URL: http://ftp.gsr.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2008/.

11. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2008.** – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2010. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
12. **Кириченко В.В., Краев Ю.А.** Использование подземных ядерных взрывов, проведенных на Семипалатинском испытательном полигоне, для сейсмической калибровки центральной части Северной Евразии // Геофизика и проблемы нераспространения. Вестник НЯЦ РК. Вып. 2. – Курчатова: НЯЦ РК, 2001. – С. 69–76.
13. **Кедров О.К.** Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. – М.–Саранск: ИФЗ РАН, 2005. – 420 с.
14. **Габсатарова И.П.** Исследование пространственно-временных особенностей сейсмичности на Северном Кавказе: Дис. на соиск. уч. степ. канд. ф.-м. наук. – М.: ИФЗ РАН, 2011. – 178 с.
15. **Kennett B.L.N., Engdahl E.R.** Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical J. International. – 1991. – N 105. – P. 429–465.
16. **Kennett B.L.N., Engdahl E.R. and Buland R.** Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // Geophysical J. International. – 1995. – N 122. – P. 108–124.
17. **Габсатарова И.П., Чепкунас Л.С., Бабкова Е.А., Малянова Л.С., Рыжикова М.И.** Калининградские землетрясения 21 сентября 2004 года с $M_w=4.6$ и 4.8 , $I_0=6$ и $I_0=6-7$ (запад России) // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 343–363.
18. **Габсатарова И.П. (отв. сост.), Малянова Л.С. (сост.).** Каталог механизмов очагов землетрясений Северного Кавказа за 2008 г. ($N=23$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
19. **Ландер А.В.** Комплекс программ определения механизмов очагов землетрясений и их графического представления // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01.2003–31.12.2003) // Отчет КОМСП ГС РАН. – Петропавловск-Камчатский: Фонды КОМСП ГС РАН, 2004. – С. 359–380.
20. **Ландер А.В.** Описание и инструкция для пользователя комплекса программ FA (расчет и графическое представление механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений P -волн). – М.: Фонды автора, 2006. – 27 с.
21. **Керимов И.А., Гайсумов М.Я.** Сейсмичность и современная геодинамика территории Чеченской Республики // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Материалы II Всероссийской научно-технической конференции. – Грозный: АН Чеченской Республики, 2012. – С. 43–64.
22. **Рогожин Е.А., Габсатарова И.П., Погода Э.В.** Зоны ВОЗ и сейсмичность территории Республики Северная Осетия–Алания // Сейсмичность Северной Евразии (Материалы Международной конференции, посвященной 10-летию выпуска сборника научных трудов «Землетрясения Северной Евразии», Обнинск, 28–31 июля 2008 г.). – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 243–249.
23. **Горбунова И.В., Бойчук А.Н., Доцев Н.Т., Кальметьева З.А., Капитанова Т.А., Кучай О.А., Михайлова Н.Н., Пустовитенко Б.Г., Симбирцева И.Г., Товмасян А.К.** Интерпретация очаговых волн на записях землетрясений / Отв. ред. Н.В. Кондорская // Геофизический комитет при Президенте РАН. – М.–Бишкек: Наука, 1992. – 130 с.
24. **Горбунова И.В.** Определение протяженности очага и направления разрыва по волновой картине на сейсмограмме // ДАН СССР. – 1981. – 261. – № 4. – С. 836–839.
25. **Чепкунас Л.С., Малянова Л.С.** Очаговые параметры сильных землетрясений Земли. (См. раздел II (Спектры и динамические параметры очагов землетрясений) в наст. сб.).
26. **Михеева А.В.** Программно-алгоритмический инструментарий подготовки и анализа сейсмических данных в информационно-вычислительном комплексе EEDB: Автореф. дис. канд. ф.-м. наук. – Новосибирск: 2011. – 25 с.
27. **Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я.** Этапы развития афтершоковых последовательностей сильных землетрясений мира // Физика Земли. – 2008. – № 12. – С. 3–23.
28. **Арефьев С.С., Кузнецова К.И., Малевская О.Я., Шебалин Н.В., Штейнберг В.В.** Глава 3. Афтершоки. 3.4. Режим // Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Сейсмология. Геология. Геофизика. – М.: Наука, 1980. – С. 97–116.
29. **Добровольский И.П.** Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: ИФЗ РАН, 1991. – 219 с.
30. **Никонов А.А.** Сильнейшие землетрясения Восточного Кавказа с точки зрения геодинамики // Геодинамика Кавказа / Отв. ред. А.А. Белов, М.А. Сатиан. – М.: Наука, 1989. – С. 148–156.

31. **Кондорская Н.В. (отв. сост.), Кисловская В.В., Павлова Л.Н., Хромецкая Е.А.** Основной каталог сильных землетрясений на территории СССР // Землетрясения в СССР в 1976 году. – М.: Наука, 1980. – С. 116–125.
32. **Папалашвили В.Г. (отв. сост.), Дарахвелидзе Л.К., Лабадзе Л.В., Чиковани В.В., Сргсян Г.В., Израйлевский А.** Региональный каталог Кавказа // Землетрясения в СССР в 1976 году. – М.: Наука, 1980. – С. 127–137.
33. **Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Малянова Л.С.** Северный Кавказ // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 100–116.
34. **Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Щукин Ю.К., Донцова Г.Ю.** Сейсмогенерирующие структуры // Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозный. – М.: Минстрой России, 1996. – С. 38–47.
35. **Мальшева В.В.** Геологические и техногенные условия возникновения землетрясений на нефтяных месторождениях Терско-Сунженской зоны дислокаций: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук. – Грозный, 1992. – 26 с.
36. **Бабаян Т.О., Кулиев Ф.Т., Папалашвили В.Г., Шебалин Н.В., Вандышева Н.В. (отв. сост.).** П б. Кавказ [50–1974 гг., $M \geq 4.0$, $I_0 \geq 5$] // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 69–170.
37. **Абелев Е.Г., Антонов В.В., Габсатарова И.П., Захарова А.И., Иванова Т.П., Лякумович Б.А., Новицкая Н.Ф., Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С.** Землетрясения 4 марта на Северном Кавказе // Землетрясения в СССР в 1984 году. – М.: Наука, 1987. – С. 35–44.
38. **Богачкин Б.М., Габсатарова И.П., Захарова А.И., Лякумович Б.А., Новицкая Н.А., Рогожин Е.А., Старовойт О.Е.** Землетрясение 3.08.1989 г. на Северном Кавказе // Землетрясения в СССР в 1989 году. – М.: Наука, 1993. – С. 32–44.
39. **Асманов О.А., Амиров С.Р., Даниялов М.Г., Левкович Р.А., Мирзалиев М.М., Осокина А.Ш., Габсатарова И.П., Михайлова Р.С.** Кизилюртское землетрясение 31 января 1999 года с $M_S=5.5$, $I_0=7$ (Дагестан) // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск: ГС РАН, 2005. – С. 254–263.
40. **Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Девяткина Л.В., Головкова Л.В.** Северный Кавказ // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 81–96.