

ВЛИЯНИЕ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВЗРЫВОВ, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Н.Т. Тарасов, Н.В. Тарасова

ИФЗ РАН

Рассмотрено изменение сейсмичности Гармского района Таджикистана после облучения его коры мощными электромагнитными импульсами (ЭИ) и после семипалатинских ядерных взрывов (ЯВ). Показано, что воздействие ЯВ, также как и ЭИ, вызывает статистически значимую активизацию сейсмичности и приводит к значительному росту суммарной сейсмической энергии (ССЭ). В пространстве выявлены две области аномального повышения суммарной энергии после облучения и взрывов, приуроченные к активным разломам. Обе имеют сложную конфигурацию в виде двух "лепестков", расположенных на разных крыльях этих разломов. В обоих случаях один из "лепестков" проявляется после ЭИ, а второй - после ЯВ. Показано, что каждая из этих "бабочек" представляет собой единую аномальную область повышенных тектонических напряжений. Воздействие ЯВ изучено также до начала и после завершения этих экспериментов. В обоих случаях этих аномальных областей не наблюдалось, а после их завершения в радиусе ~60 км от источника ЭИ вообще не наблюдалось областей повышенных напряжений. Следовательно, облучение коры привело к их релаксации на территории площадью ~3500 км², но, судя по значительной активизации сейсмичности, вызванной ЯВ, на юго-западной и юго-восточной окраинах, - к росту напряжений на периферии облучаемой области.

Введение

В последние 10-20 лет геофизики уделяли большое внимание изучению инициированной сейсмичности. Такой интерес обусловлен тем, что исследования триггерных явлений имеют большое значение как для понимания физики очага землетрясений и более полного представления о сейсмическом процессе в целом, так и для изучения принципиальной возможности их использования для прогноза и предотвращения катастрофических землетрясений. В результате было установлено, что целый ряд естественных и техногенных факторов разной физической природы может вызывать заметные изменения сейсмического режима в результате их триггерного воздействия на области подготовки землетрясений.

В работах [Тарасов, 1997; Тарасов и др., 1999] было обнаружено, что облучение коры двух наиболее сейсмоактивных областей Средней Азии - Гармского района Таджикистана и Северного Тянь-Шаня мощными электромагнитными импульсами вызвало заметную статистически значимую активизацию сейсмичности этих областей. Повышение суммарной сейсмической энергии оказалось при этом на 5-6 порядков больше энергии ЭИ, откуда следовало, что их воздействие является триггерным и инициирует дополнительное излучение накопленной в коре энергии упругих деформаций в виде серии относительно слабых землетрясений.

В обеих областях это проявилось в изменении пространственно-временной структуры сейсмичности [Tarasov, Tarasova, 2004; Тарасов, 2009] и в статистически

значимом росте скорости высвобождения сеймотектонических деформаций (вносящих свой вклад в процесс квазипластического деформирования коры) в периоды проведения экспериментов по облучению коры [Тарасов, 2010; Тарасов, Тарасова, 2011]. Это привело к дополнительной релаксации упругих напряжений на 0.4-1.7 бар, причем наиболее заметная релаксация наблюдалась в областях их наибольшей интенсивности. Тем не менее, осталось до конца неясным, как изменилось поле напряжений после завершения этих экспериментов.

Электромагнитные поля оказывают влияние на землетрясения одновременно с целым рядом природных и техногенных факторов, и характер сейсмического отклика среды на облучение может нелинейным образом зависеть от их сочетания. Помимо ЭИ, наиболее заметное влияние на сейсмичность этих областей, по-видимому, оказывали семипалатинском ядерные взрывы (ЯВ) [Тарасов, Тарасова, 1995]. Однако пока влияние комбинированного воздействия ЭИ и ЯВ на сейсмичность остается мало изученным. Его дальнейшее исследование позволило бы получить новые данные о физическом механизме триггерных воздействий на область подготовки землетрясений и о геодинамических последствиях таких воздействий. Поэтому в данной работе влияние комбинированного воздействия ЭИ и ЯВ на сейсмичность Гармского района рассмотрено более детально.

Район наблюдений и методика анализа его сейсмичности

Гармский район расположен в зоне сочленения Евразийской и Индийской литосферных плит. Северная ее часть, сложенная породами докембрийского и палеозойского возраста, относится к структурам Южного Тянь-Шаня, а южная - к палеозойским структурам Северо-Памирского поднятия. Между ними располагается Таджикская депрессия, где верхние 10-15 км представляют собой кайнозой-мезозойскую терригенную толщу, лежащую на палеозойском фундаменте (рис. 1). С юга Таджикская депрессия ограничена глубинным Дарваз-Каракульским разломом. Этот разлом представляет собой активный левосторонний сдвиг, который простирается вдоль области сочленения депрессии и структур Северо-Памирского поднятия. В северной части депрессии выделяется Петровский надвиг, который простирается параллельно области ее сопряжения со структурами Южного Тянь-Шаня. В пределах рассматриваемой территории оба этих разлома в сейсмическом отношении являются наиболее активными.

С 1975 по 1978 г. на Гармском геофизическом полигоне ИФЗ РАН проводился эксперимент по мониторингу электропроводности земной коры. Для этого регулярно выполнялось глубинное электрическое зондирование коры с помощью импульсного источника. В качестве излучающей антенны использовался электрический диполь с

разносом электродов 3 км и сопротивлением 1.5 Ом, который служил нагрузкой мощного МГД-генератора. Установка располагалась в северной части Таджикской депрессии. Во время зондирования ток в нагрузке достигал 1.5 кА, длительность ЭИ – 2.0-2.5 с, а их энергия составляла 6.7-8.5 МДж. Всего было проведено 34 зондирования [Сидорин, 2006]. Семипалатинский полигон расположен в 1400 км к северо-востоку от района наблюдений. Подземные ЯВ производились на нем с 1961г. по 1989г. [www.cdidc.org]. Из них для анализа было отобрано 254 относительно сильных ($m_b \geq 4.8$).

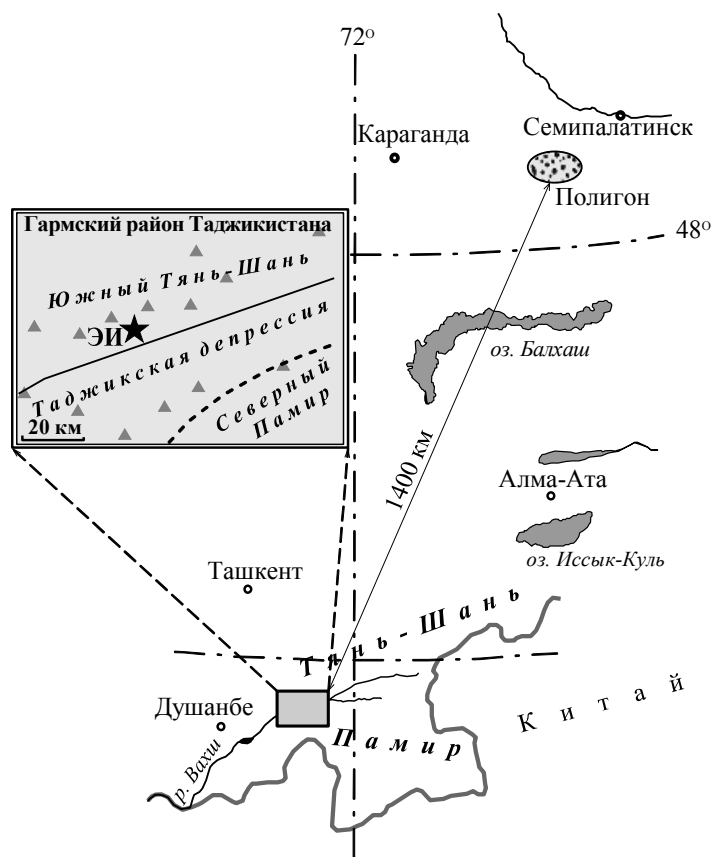


Рис. 1. Схема эксперимента. Эллипсом показан Семипалатинский полигон, прямоугольником – Гармский район Таджикистана. На врезке он дан более подробно. Пунктирной и сплошной линиями обозначены Дарваз–Каракульский и Петровский разломы. Звездочкой отмечено положение источника электромагнитного облучения коры.

Для анализа сейсмичности Гармского района использовались землетрясения только представительных классов ($c K > 6.5$), взятые из каталога КСЭ ИФЗ РАН [Попандопуло, 1992], который содержит дату-время, энергетические классы (K), координаты и глубины гипоцентров 90438 землетрясений, возникших в рассматриваемой области с 1955 по 1991гг. Сначала были изучены изменения потока землетрясений и их суммарной энергии в результате воздействия ЭИ. Для их выделения на фоне естественных вариаций и

возмущений, связанных с влиянием других факторов, применялась методика наложения эпох с использованием временных окон шириной ± 30 сут от момента излучения каждого ЭИ, которые затем совмещались во времени.

С этой целью по всем ЭИ производилась выборка землетрясений, возникших в пределах таких окон, абсолютное время возникновения каждого из них заменялось на время, пересчитанное относительно момента соответствующего ЭИ и вычислялась его энергия $E=10^K$, Дж, после чего все выборки объединялись в общий подкаталог, который использовался для построения зависимостей $N(t)$ - суточного количества землетрясений и $E(t)$ - их ССЭ от времени. Затем оценивались их средние значения до ($t<0$) и после ($t>0$) облучения, их изменения после ЭИ - ΔN , ΔE и статистическая значимость (по критерию Вилкоксона-Манна-Уитни [Никитин, 1986]). Помимо этого определялась также ССЭ всех землетрясений до (E_b) и после (E_a) ЭИ, их разность и отношение E_a/E_b .

Аналогично рассматривались изменения сейсмичности после ЯВ. Сначала для сопоставления откликов сейсмичности на ЯВ и ЭИ из общего числа были отобраны ЯВ, произведенные только в период проведения экспериментов по облучению коры, т.е. с 1975 по 1978 г (всего 34 ЯВ), что необходимо для исключения погрешностей, связанных с низкочастотными вариациями, а затем рассмотрено воздействие ЯВ и в другие периоды.

Результаты

На рисунке 2а представлено изменение суточного количества землетрясений N_k до и после ЭИ в зависимости от времени. Видно, что в первые 5 сут после ЭИ значения N_k остаются на уровне фона, а затем возникает заметная активизация сейсмичности, которая продолжается около 20 сут. Похожие изменения сейсмичности происходят и после ЯВ (рис. 2б). После них наблюдается примерно такая же задержка, а затем возникает активизация сейсмичности, которая отмечается рядом максимумов, амплитуды которых заметно превышают средний уровень фона (при $t<0$). Средние значения N_k возрастают после ЭИ и ЯВ, соответственно, на 16.0% и на 8.5%., причем эти изменения статистически высоко значимы. При этом приращения ССЭ существенно выше, соответственно, 65.5% и 74.9%, сопоставимы по величине и также статистически значимы (см. табл.1).

Тем не менее, приращение ССЭ после ЭИ значительно выше, чем после ЯВ. Это видно из таблицы 2, где даны не относительные, а их абсолютные значения. Из нее также видно, что в обоих случаях приращение ССЭ превышает энергию этих воздействий на 3-5 порядков, т.е. их воздействие является триггерным. Там же даны оценки приращения ССЭ в среднем на одно воздействие ЭИ и ЯВ и аналогичные оценки, полученные по выборке ЭИ, перед которыми не производились ЯВ и по выборке ЯВ, перед которыми не

выполнялось облучение коры ЭИ. Из их сопоставления следует, что облучение коры перед ЯВ повышает эффективность их триггерного воздействия почти в 10 раз, а взрывы, произведенные перед ЭИ, напротив, в 6-7 раз снижают их эффективность.

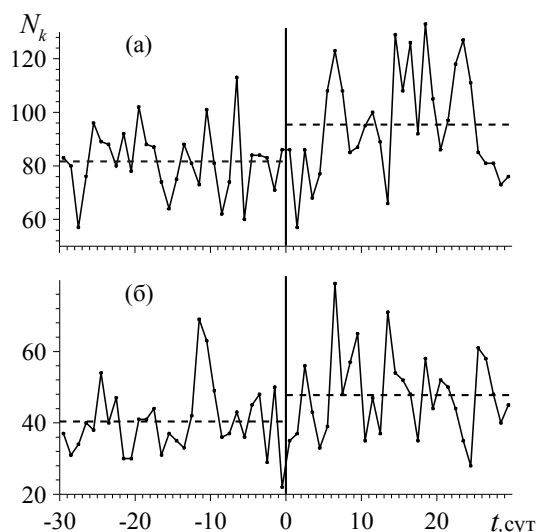


Рис. 2. Изменение во времени N_k – количества землетрясений Гармского района, до ($t < 0$) и после ($t > 0$) облучения коры ЭИ (а), а также до и после ЯВ (б). Пунктиром показаны средний уровень фона перед ЭИ и ЯВ и среднее значение N_k после них.

Таблица 1. Возрастание количества землетрясений (ΔN) и их ССЭ (ΔE) после ЭИ и ЯВ относительно уровня фона и их статистическая значимость (соответственно P_N и P_E).

Триггер	ΔN , %	ΔE , %	P_N	P_E
ЭИ	16.0	65.5	0.0004	0.0402
ЯВ	8.5	74.9	0.0034	0.0095

Таблица 2. Приращение ССЭ после всех ЭИ и ЯВ (ΔE), приращение в среднем на одно воздействие (Δe), такая же оценка, полученная по воздействиям, которые не предварялись влиянием другого фактора ($\Delta \epsilon$) и суммарная энергия воздействий (E_i).

Триггер	ΔE , Дж	E_i , Дж	Δe , Дж	$\Delta \epsilon$, Дж
ЭИ	$4.14 \cdot 10^{13}$	$2.9 \cdot 10^8$	$1.22 \cdot 10^{12}$	$7.92 \cdot 10^{12}$
ЯВ	$2.87 \cdot 10^{13}$	$2.7 \cdot 10^{10}$	$0.84 \cdot 10^{12}$	$0.08 \cdot 10^{12}$

В пределах Таджикской депрессии изучены изменения эффективности триггерного воздействия ЭИ и ЯВ в зависимости от глубины. Она характеризовалась отношением ССЭ землетрясений, возникших после и до их воздействия (E_a/E_b) в пределах слоев мощностью 1 км, на которые был разбит вертикальный разрез депрессии. Полученные зависимости изменения E_a/E_b с глубиной показывают, что после облучения коры ЭИ

сильное приращение ССЭ наблюдается в приповерхностном ($h=0-5$ км) слое кайнозойских отложений депрессии (рис. 3а), тогда как после ЯВ ССЭ в нем практически не меняется. Заметный рост значений E_a/E_b после ЯВ наблюдается при $h>0-5$ км в слое мезозойских отложениях и в палеозойском фундаменте (рис. 3б). Таким образом, приращение ССЭ после ЭИ и ЯВ происходит в разных геологических структурах, что может свидетельствовать о разном механизме их триггерного воздействия.

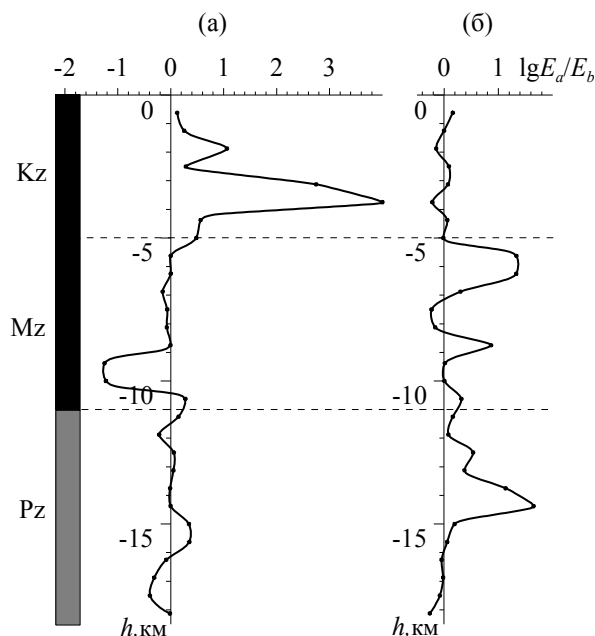


Рис. 3. Зависимость от глубины (h) отношения ССЭ землетрясений Таджикской депрессии (E_a/E_b) после и до облучения коры (а) и аналогичная зависимость E_a/E_b после и до ЯВ (б).

В связи с этим рассмотрено пространственное перераспределение ССЭ после ЭИ и ЯВ. С этой целью вся исследуемая область была разбита на сетку с ячейками площадью 50 км^2 и произведены выборки землетрясений, возникших в каждой из них, по которым для всех ячеек были получены оценки ССЭ до (E_b) и после (E_a) ЭИ и построена карта их отношения E_a/E_b , характеризующая пространственное распределение изменений ССЭ (рис. 4а). Аналогично была построена карта распределение E_a/E_b после ЯВ (рис. 4б). На обеих картах выделяются по две обширные аномалии, в пределах которых ССЭ возросла на порядок и более, приуроченные к второстепенному разлому вблизи от источника ЭИ (1 и 3) и активному Дарваз-Каракульскому разлому в 50 км к югу от источника (2 и 4).

Интересно, что аномалии, возникшие после ЭИ и ЯВ (соответственно, 1,3 и 2,4), не совпадают по своему положению, а смещены относительно друг друга по направлению простирания упомянутых разломов, образуя в пространстве своеобразные "бабочки". Это видно на рисунке 5, где представлена карта, полученная в результате наложения предыдущих карт. По сути он показывает, что в пространстве выделяются две области, в

пределах которых комбинированное воздействие ЭИ и ЯВ вызывает аномально высокое приращение ССЭ. Обе они имеют сложную конфигурацию в виде двух "лепестков", расположенных на разных крыльях этих разломов. Один из "лепестков" проявляется после ЭИ, а второй - после ЯВ, т.е. ЭИ и ЯВ вызвали активизацию разных геологических структур, что может быть обусловлено как особенностями физико-механических характеристик слагающих их горных пород, так и разными механизмами триггерного воздействия ЭИ и ЯВ.

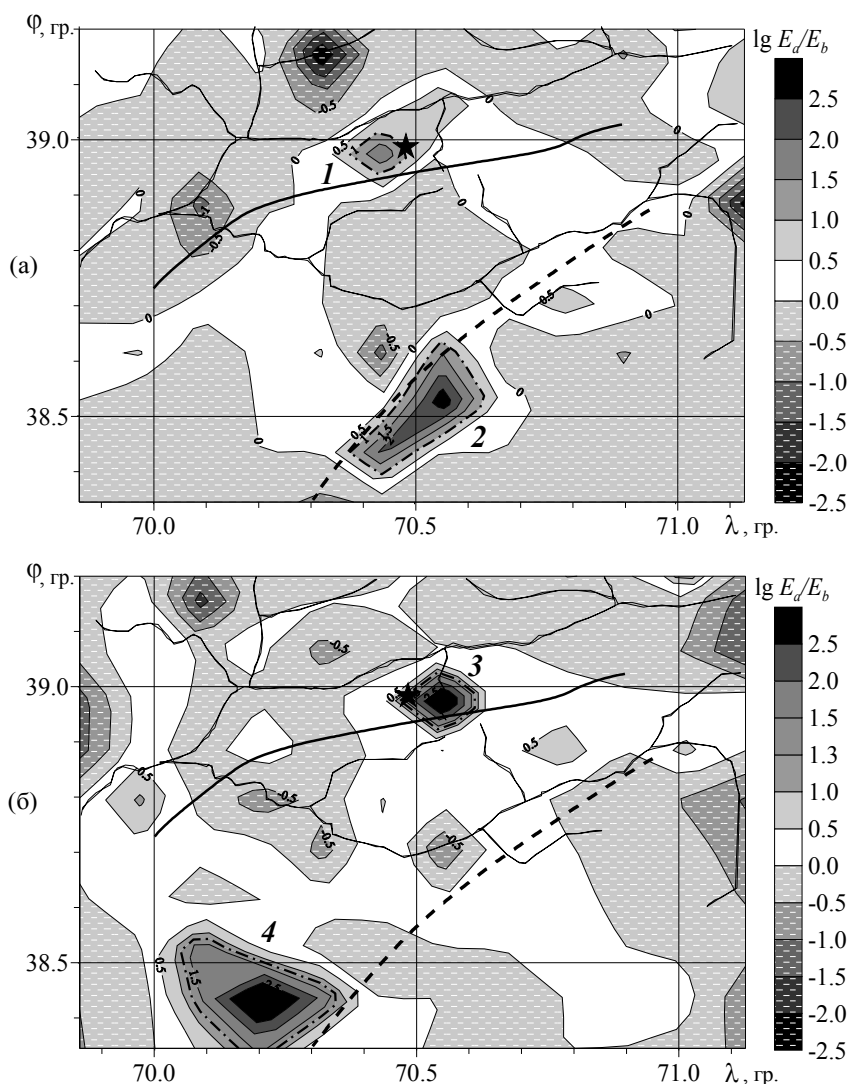


Рис. 4. Карта распределения E_a/E_b – отношения ССЭ землетрясений Гармского района, возникших после и до облучения его коры ЭИ (а) и аналогичное распределение E_a/E_b до и после ЯВ (б). Цифрами 1, 2 и 3, 4 отмечены области аномального повышения E_a/E_b , соответственно, после ЭИ и после ЯВ. Пунктирной и сплошной линиями показаны Дарваз–Каракульский и Петровский разломы. Положение источника ЭИ отмечено звездочкой. Тонкими линиями показана речная сеть.

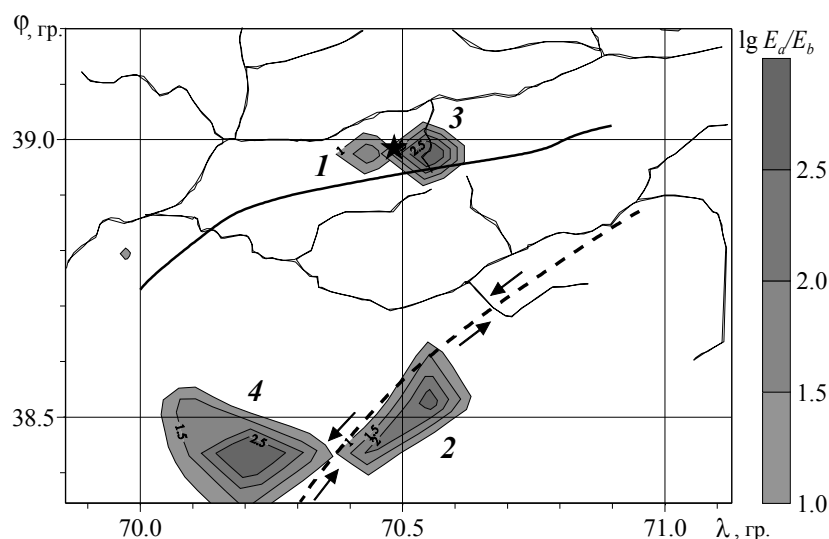


Рис. 5. Результат совмещения областей аномального повышения E_a/E_b после ЭИ (1 и 2) и после ЯВ (3 и 4) на предыдущих картах (рис. 4). Обозначения те же.

Обсуждение результатов

Тем не менее остается неясным, что в большей мере определяет возникновение таких областей - геологическое строение или локальные изменения поля напряжений. Ранее аномальное повышение ССЭ после ЭИ отмечалась в областях концентрации тектонических напряжений. Вид аномалий на рисунке 4 позволяет предположить, это характерно и для ЯВ. Тогда конфигурация этих аномалий должна отражать конфигурацию поля аномальных напряжений. Воздействие ЯВ было изучено не только в период облучения, но и за такие же периоды до начала и после завершения этих экспериментов. Оказалось, что аномалии E_a/E_b в районе Дарваз-Каракульского разлома в пятилетний период перед облучением не наблюдалось (рис. 6а). Почти на всем протяжении разлома ЯВ приводили к уменьшению ССЭ. Однако уже тогда она, по-видимому, начала формироваться. На это указывает заметное повышение ССЭ, которое вызывали ЯВ в его юго-западном сегменте.

Аномалии в области источника облучения тогда тоже не было, но в районе Петровского разлома наблюдались две области аномального повышения ССЭ после ЯВ, которые располагались на разных его крыльях и смещены одна относительно другой по его простиранию. К нему же приурочены еще две аномальные области, в которых ЯВ вызывали падение ССЭ. Они также располагались на разных крыльях этого разлома и были смещены по его простиранию. Эта пара аномалий была ориентирована в крест предыдущей. Все они пересекались в области разлома к которой был приурочен эпицентр сильнейшего землетрясения района наблюдений с $m_b=5.6$ и глубиной гипоцентра 13 км, которое произошло непосредственно перед началом анализируемого интервала времени.

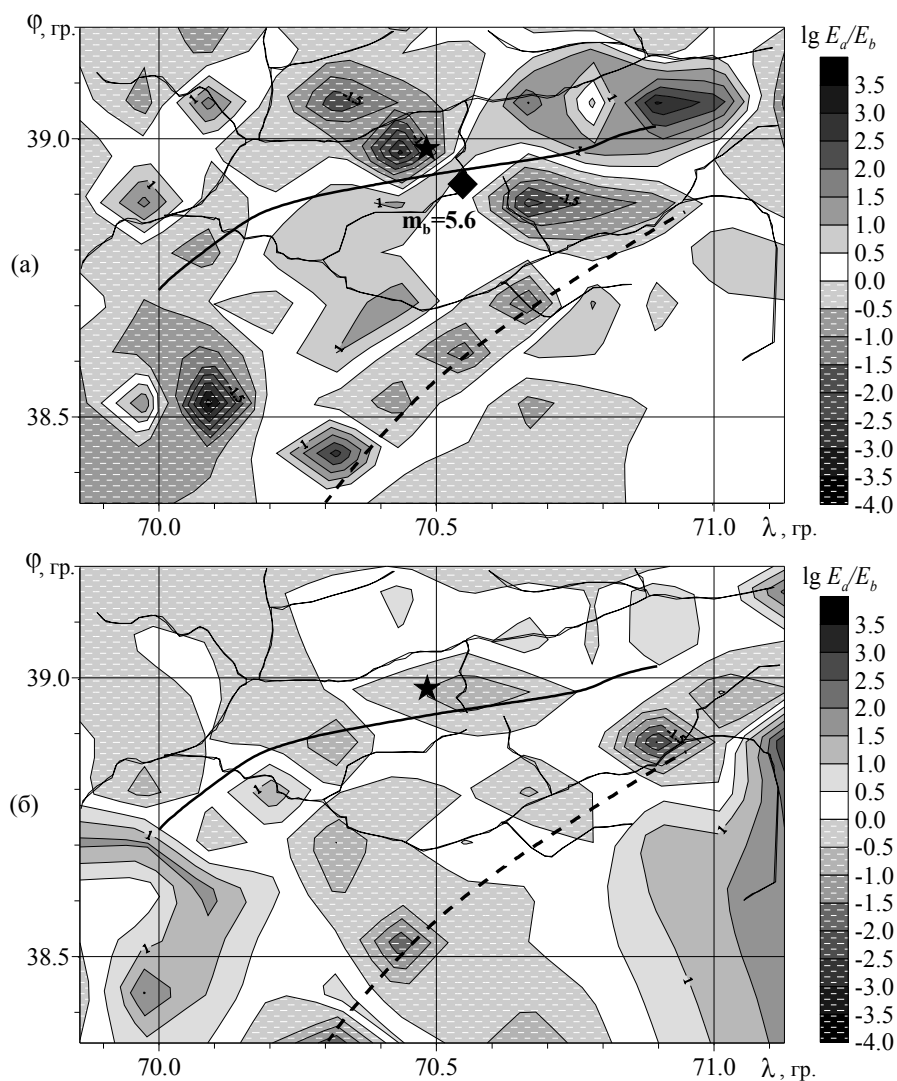


Рис. 6. Карта распределения E_d/E_b – отношения ССЭ землетрясений Гармского района, возникших после и до ЯВ, произведенных за пятилетний период до начала экспериментов по облучению коры ЭИ, т.е. с 1970г. по 1974г. (а), и за такой же временной интервал (с 1979 по 1983г.) после их завершения (б). Ромбом отмечено положение эпицентра сильнейшего землетрясения этой области 22.03.1969г. с $m_b=5.6$. Обозначения те же.

Механизм его очага и простирание облака афтершоков (рис. 7а) показывают, что это правосторонний сдвиг по Петровскому разлому. На рисунке 7б показаны области повышенных и пониженных напряжений, которые должны были возникнуть в результате постсейсмических деформаций в окрестности очага. По своей конфигурации они хорошо согласуются с областями аномального повышения и понижения ССЭ в эпицентральной зоне этого землетрясения (рис. 6а). Это подтверждает, что ЯВ вызывают значительные повышения ССЭ в областях с высокой интенсивностью напряжений. Более того, показывают, что в областях низких напряжений после ЯВ происходит уменьшение ССЭ.

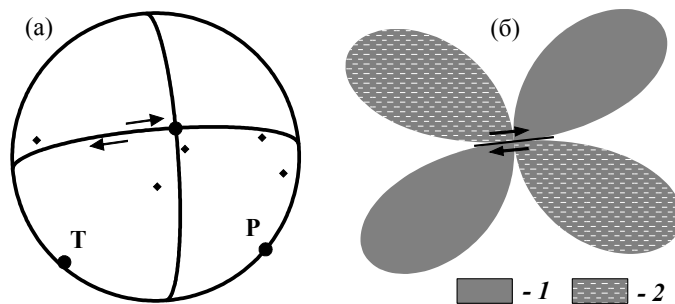


Рис. 7. Механизм очага сильнейшего землетрясения области наблюдений 22.03.1969г. с $m_b=5.6$ (а) и области повышенных (1) и пониженных напряжений (2), возникших в результате постсейсмических деформаций (б). Р и Т - оси сжатия и растяжения, ромбики - эпицентры его афтершоков, произошедших в течение часа после основного толчка.

Это исключает интерпретацию аномальных областей, выявленных в период облучения коры на Дарваз-Каракульском и второстепенном разломах (рис. 5), как результат подвижки или аномально быстрого крипа, поскольку там не наблюдалось областей понижения ССЭ после ЯВ. Скорее наоборот, они могли возникнуть, когда скорость крипа в области аномалий по каким-то причинам упала, или движение на этих сегментах прекратилось вовсе. Это и могло привести к росту напряжений, возможно к подготовке сильных землетрясений.

После завершения экспериментов по облучению коры в радиусе 50-70 км от источника облучения вообще не наблюдалось областей повышенных напряжений (рис. 6б). Следовательно, облучение коры привело к релаксации аномально высоких напряжений на обширной территории рассматриваемой области площадью порядка 3500 км². Однако, судя по значительной активизации сейсмичности, вызванной ЯВ на ее юго-западной и восточной-юго-восточной окраинах, это привело к повышению интенсивности напряжений на периферии облучаемой области.

Выводы

1. Облучение сейсмоактивных областей электромагнитными полями приводит к заметной дополнительной релаксации упругих напряжений. Это показывает, что существует принципиальная возможность использовать облучение коры для предотвращения катастрофических землетрясений.

2. Наиболее заметная активизация сейсмичности после облучения и взрывов наблюдается в областях концентрации напряжений. Это может быть использовано для мониторинга напряженного состояния коры с целью прогноза землетрясений.

Литература

- Никитин А.А.* Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра. 1986. 342с.
- Попандоуло Г.А.* Определение координат гипоцентров местных землетрясений на Гармском геофизическом полигоне // Землетрясения и процессы их подготовки. М.: Наука. 1991. С. 5-23.
- Сидорин А.Я.* Первое применение МГД-генератора в геофизике: Эксперимент на Гармском полигоне // Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2006. Ч. 1. С. 114-124
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В.* Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим. // Доклады академии наук. 1995 Т. 343. № 4. С. 543-546
- Тарасов, 1997 Тарасов Н.Т.* Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии. // Доклады академии наук. 1997. Т. 353. № 4, с.542-545.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А.* Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5, С. 152-160.
- Тарасов Н.Т.* Изменение сейсмического процесса при облучении коры мощными электромагнитными импульсами // Современные методы обработки и интерпретации электромагнитных данных. М.: “Книжный дом ЛИБРОКОМ”, 2009. С. 185-204.
- Тарасов Н.Т.* Влияние сильных электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций. // Доклады академии наук. 2010. N. 433. № 5. С. 689-692.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В.* Влияние электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // Физика Земли. 2011. № 10. С. 82–96.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V.* Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and their change under effect of high energy electromagnetic pulses // Annals of Geophysics. 2004. Vol 47. N 1. P. 199-212.