

УДК 550.34+539.3 (575.2)(04)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ АНАЛИЗА ПОТОКА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ТЕРРИТОРИИ БИШКЕКСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА В ПЕРИОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

В.Н.Сычев, Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева

Изложены результаты исследований распределений суточного количества землетрясений, произошедших на территории Бишкекского геодинамического полигона (Северный Тянь-Шань) в 2000–2005 гг. в период проведения экспериментальных электромагнитных зондирований с применением мощного источника – электроразведочного генераторного устройства, заменившего геофизические МГД-генераторы. Проанализировано сходство и различие параметров, характеризующих вариации сейсмичности при облучении коры электромагнитным полем, возбуждаемым МГД-генератором и обычным электроимпульсным источником.

Ключевые слова: триггерная сейсмичность; энергвоздействие; геосреда.

Введение. Одним из факторов, которые могут оказывать триггерное влияние на сейсмическую активность, являются мощные электромагнитные импульсы естественного или искусственного происхождения [1, 2]. Начиная с первых работ [3, 4], где был обнаружен прирост слабой сейсмичности на территории Гармского и Бишкекского полигонов после электромагнитных зондирований земной коры с применением геофизических МГД-генераторов, не вызвала сомнений значимость этих наблюдений для проблемы разрядки избыточных напряжений в геосреде и возможности уменьшения опасности катастрофического землетрясения. Проведение на Бишкекском геодинамическом полигоне (БГП, Северный Тянь-Шань) электромагнитного мониторинга земной коры с применением мощного источника – электроразведочного генераторного устройства ЭРГУ-600-2 [5], позволило продолжить исследования влияния электромагнитных импульсов. В экспериментальных режимах включения ЭРГУ-600-2 в период 2000–2005 гг. энерговклад в земную кору был сопоставим с энергией слабого землетрясения ($\sim 10^8$ Дж) и превышал энерговклад при зондированиях с использованием МГД-генераторов. В проведенном в 2000–2005 гг. эксперименте по макетированию импульсов МГД-генератора в первичный диполь в дополнение к обычным зондированиям подавалось 200 однополярных импульсов длительностью 5, 10 или 20 с каждый. Всего было прове-

дено 53 экспериментальных сеанса зондирования. Предварительные результаты обработки и интерпретации сейсмических данных в период экспериментальных зондирований приведены в работах [6–8]. Задачей следующего этапа исследований стал анализ особенностей и/или закономерностей откликов сейсмической активности.

Анализ сейсмологических данных. Для анализа слабой сейсмичности Северного Тянь-Шаня использовался каталог землетрясений (6470 событий) за 1998–2008 гг., полученный по данным сети KNET [9]. Территория исследования была выбрана внутри области БГП ($41,5\text{--}43,5^\circ$ с.ш., $73\text{--}77^\circ$ в.д.), где чувствительность сети станций сети KNET достаточна для регистрации слабых событий. По данным каталога KNET строились распределения суточного количества землетрясений в окне шириной 35 суток, причем середина окна $\{t_j-17, t_j+17\}$ приходилась на дату t_j ($j=1,2,3\ldots 53$) – время соответствующего сеанса. По этим графикам выделялись вариации суточного числа событий, происходящие после дня воздействия t_j и превышающие отклонения от среднего на величину в одно, два и три среднеквадратичных отклонения (СКО). Среднесуточное число событий и уровень СКО определялись по предшествующим дате t_j 17 суткам. Выявлено, что обычная картина флуктуации сейсмичности меняется, и чаще встречаются данные, когда общее количество событий после дня экспериментального сеанса превышает количество со-

бытий до него. Однако, наряду с этим, есть окна, в которых происходит уменьшение числа событий после электроимпульсного воздействия. Для проверки гипотезы, что наблюдаемые вариации сейсмичности не могут быть случайным совпадением, воспользуемся биномиальным распределением, которое описывает вероятность P появления n успехов при N испытаниях в случае, если вероятность успеха (появления события) при любом индивидуальном испытании равна p :

$$P = p^n (1 - p)^{N-n} \cdot N! / [n! (N - n)!].$$

Вероятность индивидуального события (случайная активация в одном окне) рассматриваем как переменную в интервале от 0 до 1. Максимум зависимости $P(p)$ достигается при $p = (n/N)$. Сравним максимальное значение с вероятностью появления n успехов при N испытаниях при равновероятном исходе одного испытания $p = 1/2$ (чему как раз и соответствует нулевая гипотеза о чисто случайной реализации распределений с приростами сейсмичности после дополнительных ЭВ). Общее число испытаний во всех рассматриваемых вариантах $N=53$ и для дополнительных ЭВ с длительностью импульса 10 секунд и более (второй и третий этапы эксперимента), соответственно, $N=35$. Для анализа результатов расчета вероятностей по приведенной формуле используем различные критерии: превышение рассчитанного значения χ^2 уровня 2,5 в 10-ти дневном интервале после дня дополнительного ЭВ и наличие вариации, отличающейся от среднего уровня более чем на полтора и одно СКО. Результаты расчетов для всех предлагаемых вариантов сведены в табл. 1. В таблице также представлены отношения равновероятного исхода испытания к рассчитанному. Во всех выбранных вариантах полученные значения отношений равновероятного исхода испы-

тания к фактическому свидетельствуют об уровне значимости, на котором появление данного числа событий не может быть отнесено за счет случайности.

Поскольку этот уровень достаточно высок, то результаты расчетов по биномиальному распределению могут рассматриваться как подтверждение гипотезы о неслучайности прироста числа событий после электровоздействий.

Более осторожные оценки степени достоверности эффекта сейсмических откликов на электромагнитные воздействия, могут быть получены при классификации вариаций суточного числа событий по принципу: захват цели, пропуск цели и ложная тревога (по аналогии со случаем предвестников землетрясения). Будем условно рассматривать проведение сеанса как прогностический принцип последующей активации, определяемой по признаку превышения 1,5 СКО в течение 12 суток после даты воздействий. Тогда при наличии такой активации в некотором окне для сеанса $\#j$ случай j можно рассматривать как “захват цели”, а ее отсутствие – как “ложную тревогу”. А для описания пропорции случаев, играющих функциональную роль “пропусков цели”, необходимо дополнить 53 окна с зондированиями аналогичными промежутками времени в 35 суток, но без включения источника импульсов. Для этого в период 1998–1999 гг. было искусственно выделено 21 35-суточное окно при сдвиге истинных дат экспериментальных сеансов 2000–2001 гг. на 2 года назад. Оказалось, что в 6 случаях из 21 на графиках суточного числа событий имеется прирост после дат мнимых сеансов (с превышением уровня 1,5 СКО). Тогда, если рассматривать совокупность окон с реальными и мнимыми включениями источника электроимпульсов, можно прийти к классификации,

Таблица 1

Результаты расчета вероятностей по биномиальному распределению

Критерий	N	n	n/N(%)	$P(1/2)$	$P_{\max}(n/N)$	$P(1/2)/P_{\max}(n/N)$
$\chi^2 > 2,5$	53 _{I-III}	31	58	0,05	0,11	0,46
$\chi^2 > 2,5$	35 _{II-III}	24	69	0,01	0,14	0,08
$N_i > N_{\text{ср}} + 1,5 \text{ СКО}$	53 _{I-III}	35	66	$7 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,06
$N_i > N_{\text{ср}} + 1,5 \text{ СКО}$	35 _{II-III}	26	74	$2 \cdot 10^{-3}$	0,15	0,01
$N_i > N_{\text{ср}} + 1 \text{ СКО}$	53 _{I-III}	42	79	$8 \cdot 10^{-3}$	0,13	$6 \cdot 10^{-5}$
$N_i > N_{\text{ср}} + 1 \text{ СКО}$	35 _{II-III}	30	86	$1 \cdot 10^{-5}$	0,19	$5 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Статистика гипотетических откликов сейсмичности по классификации теории распознавания образов

Ситуация	Все зондирования (53 сеанса)		Этапы II-III (35 сеансов)	
	кол-во	%	кол-во	%
Захват цели	35	5%	26	63
Ложная тревога	18	31	9	22
Пропуск цели	6	10	6	15
Всего окон	59	100	41	100

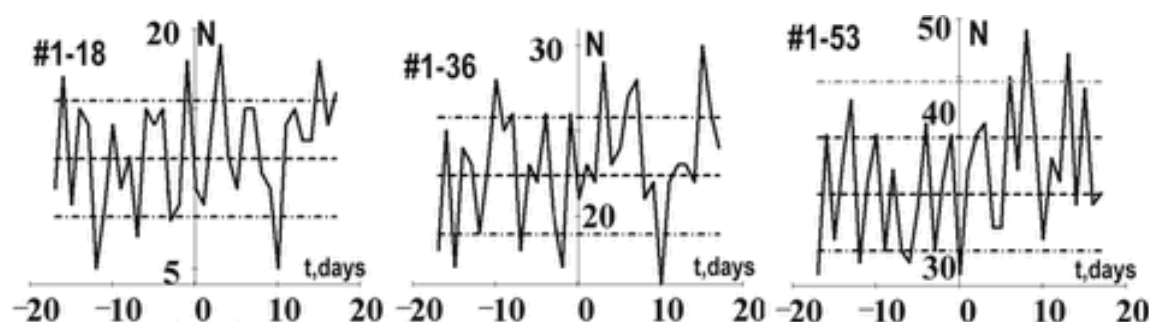


Рис. 1. Распределения суточных чисел событий, полученные при совмещении периодов с накоплением данных по этапам экспериментальных зондирований).

Пунктиром показан средний уровень и отклонение от него на ± 1 СКО и на 2 СКО.

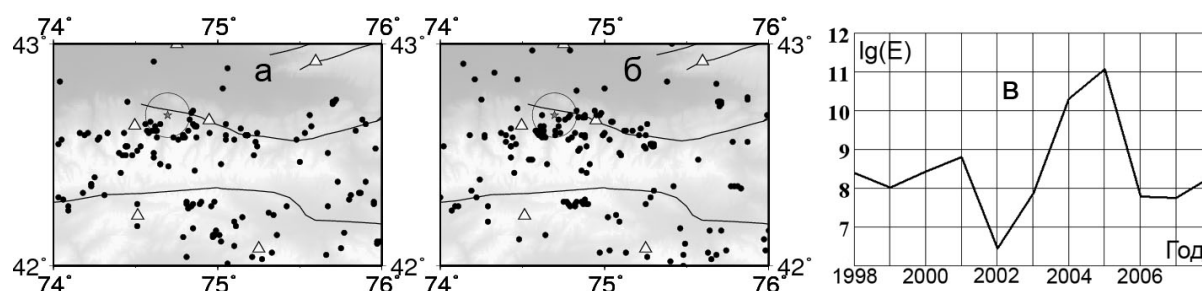


Рис. 2. Пространственное распределение событий вблизи питающего диполя до (а) и после (б) ЭВ и выделение сейсмической энергии в ближней зоне (в). Звездочка – расположение диполя; треугольники – станции сети KNET.

представленной в табл. 2. Данные табл. 2 показывают, что наилучшее соответствие электроимпульсного воздействия и реакции на него получается для длинных импульсов, применяемых на втором и третьем этапе эксперимента. Это согласуется с результатами [10], где отмечено, что в 80-х годах прошлого века активация сейсмичности на территории БГП проявилась наиболее заметно при воздействии импульсов МГД-генератора длительностью 9 с и более.

Применение метода совмещения периодов наблюдений для анализа особенностей откли-

ков. Для устранения или уменьшения субъективности при выделении эффекта сейсмического отклика среди случайных флуктуаций откликов окна $\{t_j-17, t_j+17\}$ совмещались и строились кумулятивные распределения среднесуточного количества сейсмических событий до и после даты экспериментальных зондирований.

На рис. 1 представлены кумулятивные распределения для сейсмических событий представленных классов по отдельным этапам эксперимента, отличающимся по длительности электрического импульса. На рисунке видно, что

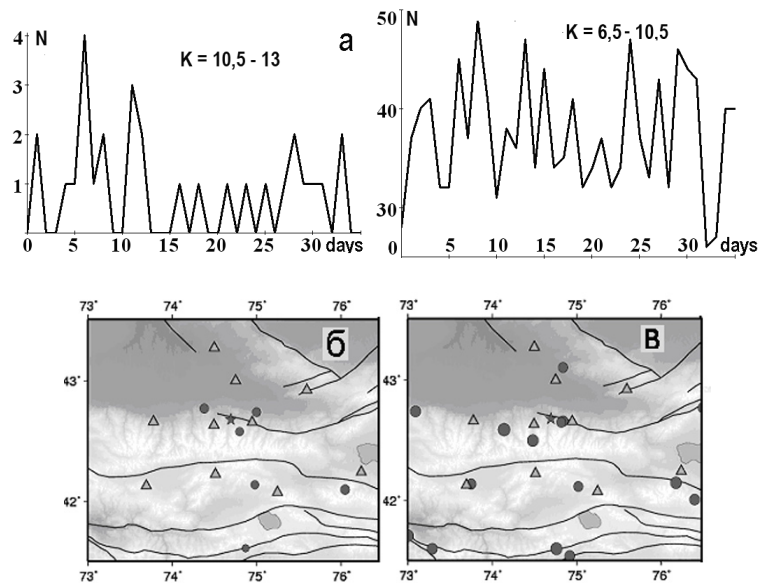


Рис. 3. Неравномерность суточного распределения событий классов 10,5–13 в интервале после электромагнитных воздействий в сравнении с распределением событий классов 6,5–10,5 (а) и расположение гипоцентров событий умеренных энергий (б), а также площадные распределения для выборок этих событий за 10 суток перед и после ЭВ (в).

увеличение длительности импульса ведет к формированию более четкой реакции, наступающей с задержкой во времени.

Эффект в ближней зоне у источника зондирования. Для выявления особенностей отклика в зоне возле источника рассматривались перераспределения событий с гипоцентрами, лежащими непосредственно вблизи первичного диполя, которые произошли в течение ± 10 суток со дня экспериментальных сеансов. Результаты этих построений представлены на рис. 2.

Обращает на себя внимание факт отсутствия сейсмических событий в зоне вблизи диполя, отмеченной окружностью диаметром 21 км в период 10 дней до ЭВ (рис. 2а). Это является следствием относительно невысокой фоновой сейсмической активности и выбором небольшой площади и интервала времени. Тем не менее, после проведения экспериментальных зондирований картина распределения землетрясений меняется. Заметно повышение сейсмической активности в зоне вокруг диполя (рис. 2б). Хотя статистика событий для небольшой площадки беднее, чем для всей территории, но отмеченное повышение сейсмичности вблизи расположения диполя в дни после воздействий имеет принципиальное значение — оно отражает соблюдение общефизического принципа близкодействия.

График временной зависимости выделившейся сейсмической энергии в ближней зоне показан на рис. 2в. На последнем этапе эксперимента, когда длительность импульсов была 20 с, замечен значительный рост выделившейся энергии. После завершения эксперимента наблюдается спад, т.е. возвращение к обычному режиму выделения энергии.

Отклики слабой сейсмичности и следование событий с классами $K > 10,5$. В период проведения экспериментальных зондирований на территории БГП произошло 42 землетрясения с энергетическими классами 10,5–13, т.е. выше границы представительного диапазона K . Кумулятивное суточное распределение этих событий в интервале ± 17 суток от совмещаемого дня ЭВ сходно, в общих чертах, с распределениями событий, построенными для других диапазонов (рис. 3). Можно отметить прирост числа событий классов 10,5–13 на 5–9 день после воздействий (по сравнению с предысторией). Но наиболее интересным является существенное уменьшение числа событий в интервале 12–17 суток после ЭВ. Это может быть проявлением частичной разрядки напряжений, произошедшей в результате стимулированного электромагнитными импульсами прироста числа событий классов 6,5–10,5. Для анализа особенностей

следования событий с “умеренной” энергией более удобным является построение кумулятивных графиков для интервала 0–34 суток после ЭВ. Это позволяет расширить границы рассматриваемого интервала 12–17 суток, что явно необходимо для идентификации паузы в следовании не очень частых событий классов 10,5–13. Результат такого перерасчета показан на рис. 3а. Он свидетельствует о неравномерности в следовании событий классов 10,5–13 с активацией после ЭВ, заметным спадом числа таких событий в интервале 12–25 суток после воздействия и новым приростом в интервале после 26 суток. Для событий представительных энергетических классов 6,5–10,5 спад активности в интервале 12–25 суток выражен слабее и связан с тем, что в эти дни отклик на внешние воздействия уже завершился. В годы до и после проведения эксперимента – 1998–1999, 2006–2008 гг. не было обнаружено подобной неравномерности следования событий.

Неравномерность временного распределения событий классов 10,5–13 оказалась более значимой, чем перераспределение их гипоцентров по площади. Для иллюстрации этого на рис. 3б показано расположение гипоцентров этих событий, произошедших в 2000–2005 гг., а на рис. 3в приведены площадные распределения гипоцентров для выборок событий с умеренной энергией, произошедших в течение 17 суток до и после ЭВ. На этих рисунках видно, что характер распределений остается тем же, в отличие, например, от случая рис. 2а, б, относящегося к событиям малых энергий. Имеющиеся данные (рис. 3) могут интерпретироваться как один из признаков того, что кратковременный прирост слабой сейсмичности после ЭВ сопровождался некоторыми составляющими эффекта частичной разрядки напряжений. Сами по себе эти данные вряд ли могут быть обоснованием того, что реализовался именно эффект “энергетического размена”, описанный в работе [11] для случая вибрационного воздействия. Однако они определяют пределы во времени, в которых с наибольшей вероятностью может сохраняться релаксированное состояние среды после воздействий с данными параметрами. Согласно рис. 3а, для рассмотренных экспериментальных зондирований это время наступает с задержкой 11–12 суток после воздействий и длится около 12 суток.

Заключение. Новое обращение к материалам экспериментальных электромагнитных зондирований и сейсмическим данным 2000–

2005 гг. еще раз продемонстрировало, что возбуждение мощных импульсов тока в земной коре обладает определенным потенциалом для стимулирования слабой сейсмичности. При этом подтверждены результаты предшествующих работ об идентификации случаев кратковременного прироста суточного числа событий на территории Северного Тянь-Шаня как откликов на электромагнитные воздействия. Также получены новые результаты, характеризующие такие отклики.

Ю.А. Трапезников придавал большое значение исследованиям различных динамических воздействий на сейсмогенерирующие зоны земной коры (энерговоздействий, по современной терминологии), рассматривая их как первые шаги на пути к управлению сейсмическим режимом.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря грантам РФФИ № 09-05-00687а, 09-05-12059-офи_м.

Литература

1. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
2. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Отв. ред. В.И. Макаров. М.: Научный мир, 2005. 400 с.
3. Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. 1997. Т.353. №4. С.542–545.
4. 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.
5. Волыхин А.М., Брагин В.Д., Zubovich A.B. и др. Проявления геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.
6. Богомолов Л.М., Авагимов А.А., Сычев В.Н., Сычева Н.А. и др. О проявлениях электротриггерной сейсмичности на Бишкекском полигоне (на пути к активному сейсмоэлектрическому мониторингу) // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли / Под ред. С.В. Гольдина. Новосибирск: СО РАН, 2005. С. 112–116.
7. Sychev V.N., Avagimov A.A., Bogomolov L.M. et al. Correlation properties of weak seismicity at Bishkek geodynamic test site in relevance to active monitoring problem // Вестник КРСУ. 2006. Т. 6. №6. С. 79–86.

8. *Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. и др.* О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: Изд. Ин-та горного дела СО РАН. 2008. С.179–188.
9. *Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Костюк А.Д.* Интенсивность сейсмотектонических деформаций как показатель динамических процессов в земной коре (на примере Тянь-Шаня) // Матер. всерос. конф. “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”. К 40-летию создания М.В. Гзовским лабораторией тектонофизики в ИФЗ РАН. М., 2009. С.374–382.
10. *Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Сычева Н.А.* К вопросу о возможности влияния пусков МГД-генераторов на вариации слабой сейсмичности Северного Тянь-Шаня // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке. Вып. 3. Москва–Бишкек, 2008. С.172–186.
11. *Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л.* Наведенная сейсмичность и возможности контролируемой разрядки накопленных напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. № 10. С.49–68.