

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-05-00359-а и 09-05-00669-а).

Литература

Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н., Спивак А.А. Выбор объекта для проведения комплексных исследований геодинамических и геофизических аномалий в зонах влияния тектонических структур // Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках земли: сб. научн. трудов. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2002. С. 114–127.

Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н. Структурно-тектоническое районирование Приокского участка Нелидово-Рязанской шовной зоны с привлечением данных дистанционного зондирования // Динамика взаимодействующих геосфер: сб. научн. трудов. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2004. С. 91–104.

Родионов В.Н. Геомеханика. М.: ИНЭК, 2004. 80 с.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТЕРРИТОРИИ БИШКЕКСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

В.Н. Сычев, Л.М. Богомолов¹, А.К. Рыбин, Н.А. Сычева

Научная станция РАН в г. Бишкек

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

sychev@gdirc.ru, bogomolov@imgg.ru

Представлены результаты исследований потока сейсмических событий, зарегистрированных при помощи цифровой телеметрической сети KNET на территории Бишкекского геодинамического полигона (Северный Тянь-Шань), где в 2000–2005 гг. проводились экспериментальные электромагнитные зондирования с применением мощного источника – электроразведочного генераторного устройства, заменившего геофизические магнитогидродинамические (МГД) генераторы. Статистический анализ данных дополнен новыми методами обработки, развитыми для диссипативных динамических систем.

Введение

Одним из факторов, которые могут оказывать триггерное влияние на сейсмическую активность, являются мощные электромагнитные импульсы естественного (магнитные бури) или искусственного происхождения [Соболев и Пономарев, 2003; Современная..., 2005]. Начиная с первых работ [Тарасов, 1997; Тарасов и др., 1999], где был обнаружен прирост слабой сейсмичности на территории Гармского и Бишкекского полигонов (БГП) после электромагнитных зондирований земной коры с применением геофизических МГД генераторов, не вызывала сомнений зна-

чимость этих наблюдений для проблемы разрядки избыточных напряжений в геосреде и возможности уменьшения опасности катастрофического землетрясения. Удобство регулировки параметров и экологическая приемлемость выделяют искусственные электромагнитные воздействия среди прочих способов стимулирования высвобождения накопленной в среде энергии при приросте числа слабых событий. В наибольшей степени это относится к невзрывным электроимпульсным системам, которые в конце XX века стали использоваться для электроразведки земной коры

В экспериментальных режимах включения электроразведочных генераторных устройств (ЭРГУ)-600-2 в период 2000–2005 гг. энерговыделение в земную кору было сопоставимо с энергией слабого землетрясения ($\sim 10^8$ Дж) и превышало энерговыделение при зондированиях с использованием МГД генераторов. При этом временная зависимость (профиль) импульсов тока была аналогична однополярным электроимпульсам при пусках МГД генераторов. Обработка и интерпретация сейсмических данных в период экспериментальных зондирований (2000–2005 гг.), в целом, подтвердили эффект кратковременного прироста слабой сейсмичности под влиянием однополярных электроимпульсов [Сычев и др., 2008]. Задачей следующего этапа исследований становится выделение особенностей и/или закономерностей откликов сейсмической активности, позволяющих выбрать наиболее правдоподобную модель среди гипотез о механизме электромагнитного влияния на среду.

Для анализа слабой сейсмичности использовался каталог землетрясений (6470 событий) за 1998–2008 гг., полученный по данным сети KNET (10 цифровых телеметрических станций). При исследовании наведенной сейсмичности желательнее использовать события малых энергетических классов (6–7). Регистрация таких слабых событий возможна только в том случае, если они произошли либо внутри сети KNET, либо вблизи ее. При удалении от территории сети класс слабых событий будет представлен не так полно. Поэтому при анализе сейсмичности территория исследования была ограничена областью БГП (41,5–43,5° с.ш., 73–77° в.д.), внутри которого и находятся станции сети KNET, где чувствительности сети достаточно для регистрации слабых событий. Диапазон представительных классов (линейный участок на графике повторяемости) по этому каталогу $6,5 \leq K \leq 10,5$.

Особенности сейсмического режима на территории БГП в период проведения экспериментальных зондирований

Для определения усредненного эффекта электромагнитного воздействия (ЭВ) все окна $\{t_j - 17, t_j + 17\}$, где $t_j, j = 1, 2, 3 \dots 53$ – время очередного энерговоздействия, были совмещены и построены кумулятивные распределения среднесуточного количества сейсмических событий до и после ЭВ. На рис. 1, а приведены кумулятивные зависимости суточного числа событий с различными энергетическими классами. Графики показывают, что после воздействия прирост количества событий классов 7,5–8,5 начинается раньше, чем активация событий с энергиями, соответствующими диапазону $8,5 < K < 9,5$. Вместе с тем, наибольший прирост, превышающий 2 СКО (пунктир), отмечается для событий классов 8,5–9,5.

На рис. 1, б показаны аналоги графика повторяемости, построенные по двум выборкам. Для построения графиков были сформированы два каталога: один содержал события, произошедшие в 10-дневном интервале до ЭВ, а другой – в 10-днев-

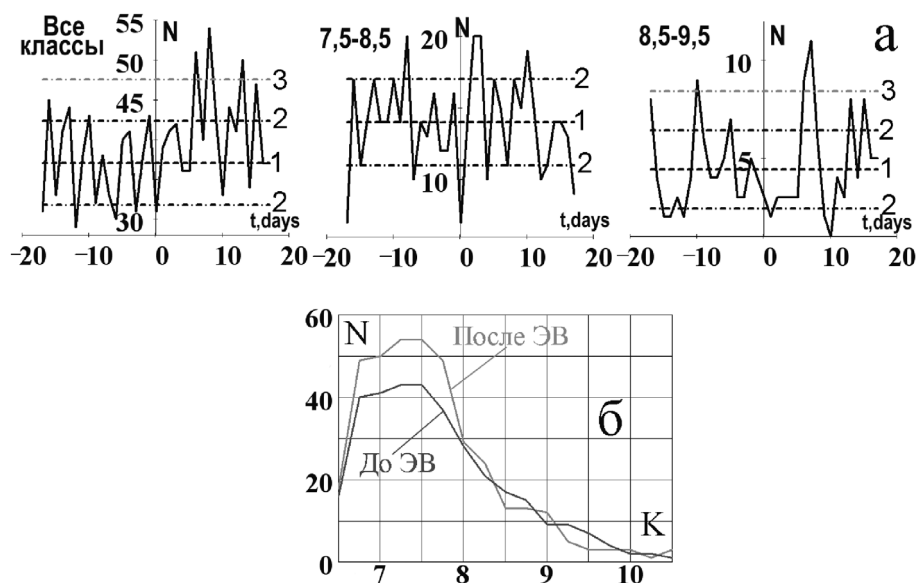


Рис. 1. Кумулятивные распределения суточного количества сейсмических событий для территории БГП (а). Пунктиром показано среднее значение, найденное по первым 17 суткам до ЭВ (1), и среднеквадратичное отклонение от него (2) и 2 СКО (3). Зависимости количества сейсмических событий в 10 дневном интервале до и после ЭВ от класса землетрясения (б)

ном после ЭВ. Площадь между этими кривыми описывает прирост сейсмичности после ЭВ и составляет примерно 40 событий (до – 369 и после – 410). По отношению ко всем событиям это около 5%. Прирост отчетливо проявляется в узком диапазоне классов ($7 \leq K < 8$), и из-за этого различие в «факторе b », то есть угловом коэффициенте графика повторяемости (в осях $\ln N-K$), совсем небольшое.

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, то есть 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. 1). 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 визуального анализа особенностей следования событий с «умеренной» энергией более удобным является построение кумулятивных графиков для интервала 0–34 сутки после ЭВ. Это позволяет расширить границы рассматриваемого интервала 12–17 суток, что явно необходимо для идентификации паузы в следо-

вании не очень частых событий классов 10,5–13. Ввиду того, что на третьем этапе экспериментальные зондирования проводились через 49 суток, а не через 35, переход к новому временному окну не сводится к тривиальному переносу графика из левого полуокна (см. рис. 1) и требует перерасчета. Результат такого перерасчета показан на рис. 2.

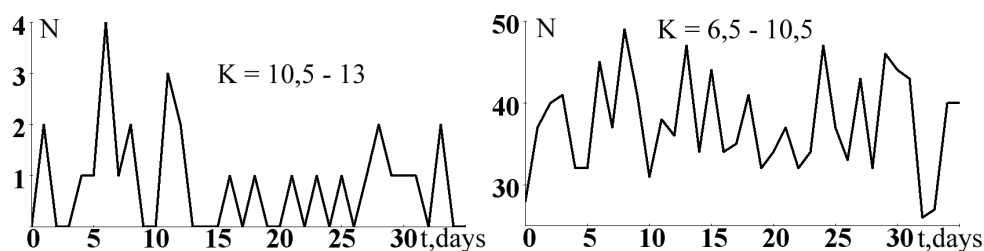


Рис. 2. Неравномерность суточного распределения событий классов 10,5–13 в интервале после электромагнитных воздействий в сравнении распределением событий классов 6,5–10,5

Он свидетельствует о неравномерности в следовании событий классов 10,5–13 с активацией после ЭВ, заметным спадом числа таких событий в интервале 12–25 сутки 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 сутки 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 гг., 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. 3, а показано расположение гипоцентров этих событий, произошедших в 2000–2005 гг., а на рис. 3, б, в приведены площадные распределения гипоцентров для выборок событий с умеренной энергией, произошедших в течение 10 суток до и после ЭВ. По этим рисункам видно, что характер распределений остается тем же. Имеющиеся данные (рис. 2) 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, что реализовался именно эффект «энергетического размена», описанный в работах [Мирзоев и др., 1987; Капустян и Юдахин, 2007] 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. 2, для рассмотренных экспериментальных зондирований это время наступает с задержкой 11–12 суток после ЭВ и длится около 12 суток.

Реконструкция напряжений, выполненная в работе [Ребецкий, Сычева, 2008] по сейсмологическим данным сети KNET (рис. 3, г) для территории БГП показала, что погружение осей максимального сжатия направлено, в основном, на север, северо-запад. При этом существуют области, где эти оси имеют субвертикальное

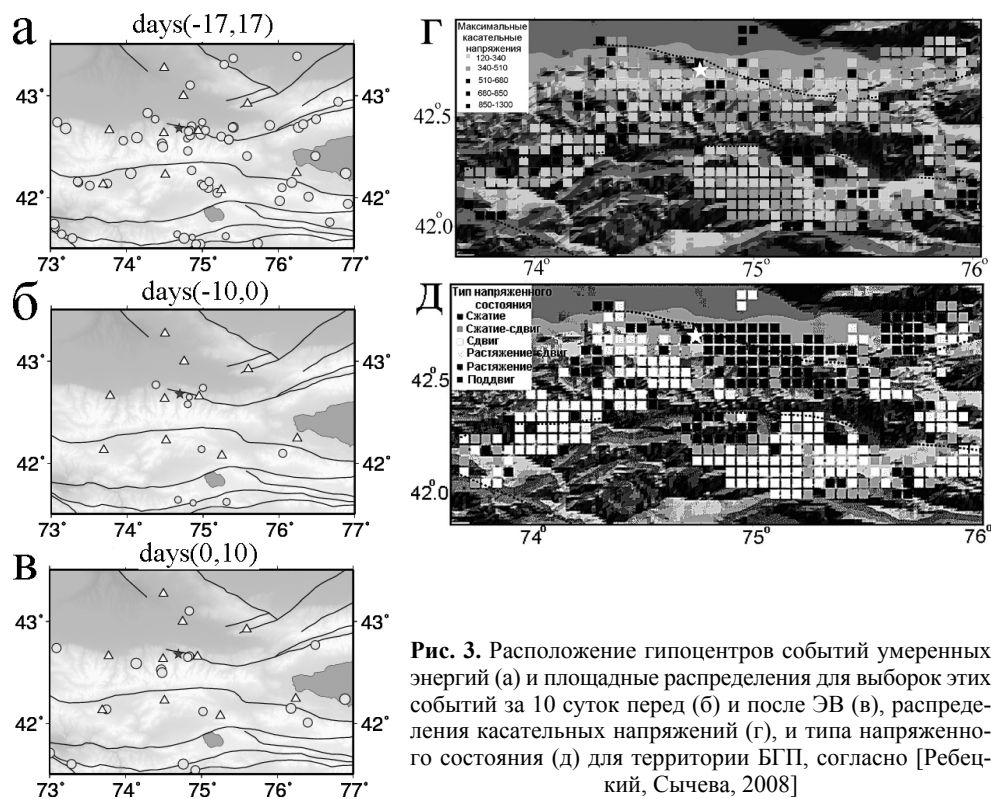


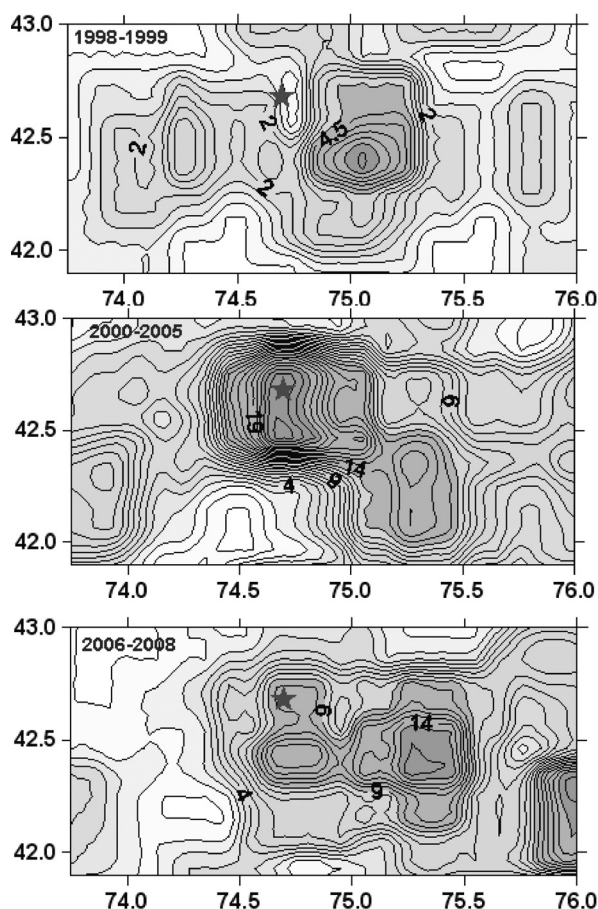
Рис. 3. Расположение гипоцентров событий умеренных энергий (а) и площадные распределения для выборок этих событий за 10 суток перед (б) и после ЭВ (в), распределения касательных напряжений (г), и типа напряженного состояния (д) для территории БГП, согласно [Ребецкий, Сычева, 2008]

направление, что отвечает режиму горизонтального растяжения (рис. 3, д). Большая часть региона имеет режим горизонтального сдвига при достаточно широком представителе режима горизонтального сжатия. Касательные напряжения на горизонтальных площадках, характеризующие направление воздействия со стороны мантии на земную кору, имеют достаточно мозаичное распределение в отличие от того, что наблюдается для зон субдукции [Ребецкий, 2007]. Тем не менее, можно выделить зону повышенных касательных напряжений, находящуюся на расстоянии около 35 км к юго-востоку от источника ЭВ. Ниже будет показано, что в период экспериментальных ЭВ происходила кластеризация событий в этой зоне. Сравнение сейсмичности в годы, предшествующие эксперименту позволяет отметить, что в это время сейсмичность проявляется в зоне сжатия. Во время проведения эксперимента она смещается в зону сочленения двух режимов сжатия и сдвига. После эксперимента происходит возврат сейсмической активности в зону сжатия.

Для определения миграции сейсмичности построены площадные распределения числа слабых событий в узком диапазоне энергетических классов $K = 8,5-9,5$, за период 1998–2008 гг. При построении изолиний сейсмичности использовалась методика скользящего окна со стороной $0,5^\circ$ и сдвигом $0,1^\circ$. Исследуемый период был разбит на временные интервалы до проведения эксперимента, после него и период дополнительных воздействий, по каждому из них получены площадные распределения слабой сейсмичности. Рассматривались только события 8,5–9,5 классов в связи с тем, что это наиболее чувствительный к воздействиям диапазон классов землетрясений. Полученный результат представлен на рис. 4. Если до начала про-

ведения эксперимента (1998–1999 гг.) область повышенной сейсмической активности в выбранном диапазоне классов находится юго-восточнее диполя, то в 2000–2005 гг. происходит смещение зоны концентрации сейсмичности на северо-запад (по направлению к источнику ЭВ). Таким образом, вполне определенно наблюдается эффект повышения сейсмической активности в непосредственной близости от питающего диполя. После завершения эксперимента в 2006–2008 гг. наблюдается тенденция к возврату зоны повышенной активности в юго-восточном направлении.

Рис. 4. Распределение сейсмических событий классов $K = 8,5–9,5$ в различные периоды времени. Изолинии – количество землетрясений за рассматриваемый интервал времени



Проявления реакции среды на ЭВ в характеристиках режима сеймотектонических деформаций

Для исследования проявлений ЭВ в вариациях фокальных параметров и режима сеймотектонических деформаций (СТД) использован каталог фокальных механизмов, который содержит параметры очагов землетрясений слабых сейсмических событий, произошедших внутри территории сети KNET (более 800) за 1999–2008 гг. Из этого каталога были сформированы 4 выборки: две выборки включали сейсмические события, которые произошли за 10 дней до ЭВ и после него, другие две выборки землетрясения, произошедшие за 17 дней до и после ЭВ. При расчете СТД

использовался подход, описанный в [Сычева и др., 2005]. Глубина исследования составляет 30 км. На рис. 5 а, б слева представлены карты СТД за 10 (123 события) и 17 (206 событий) дней до ЭВ, а справа после ЭВ (124 и 202 события). Согласно классификации режимов СТД [Юнга, 1997], до ЭВ для западной части исследуемой территории характерны сдвиговый характер СТД, а для восточной – режим транспрессии. Эти режимы наблюдаются для 10 и 17 дней. На картах СТД после ЭВ сдвиговый режим для западной части, который был характерен для этой территории до ЭВ, меняется на режим транспрессии. Этот же результат наблюдается на карте СТД за 17 дней после воздействия. При визуальном рассмотрении отме-

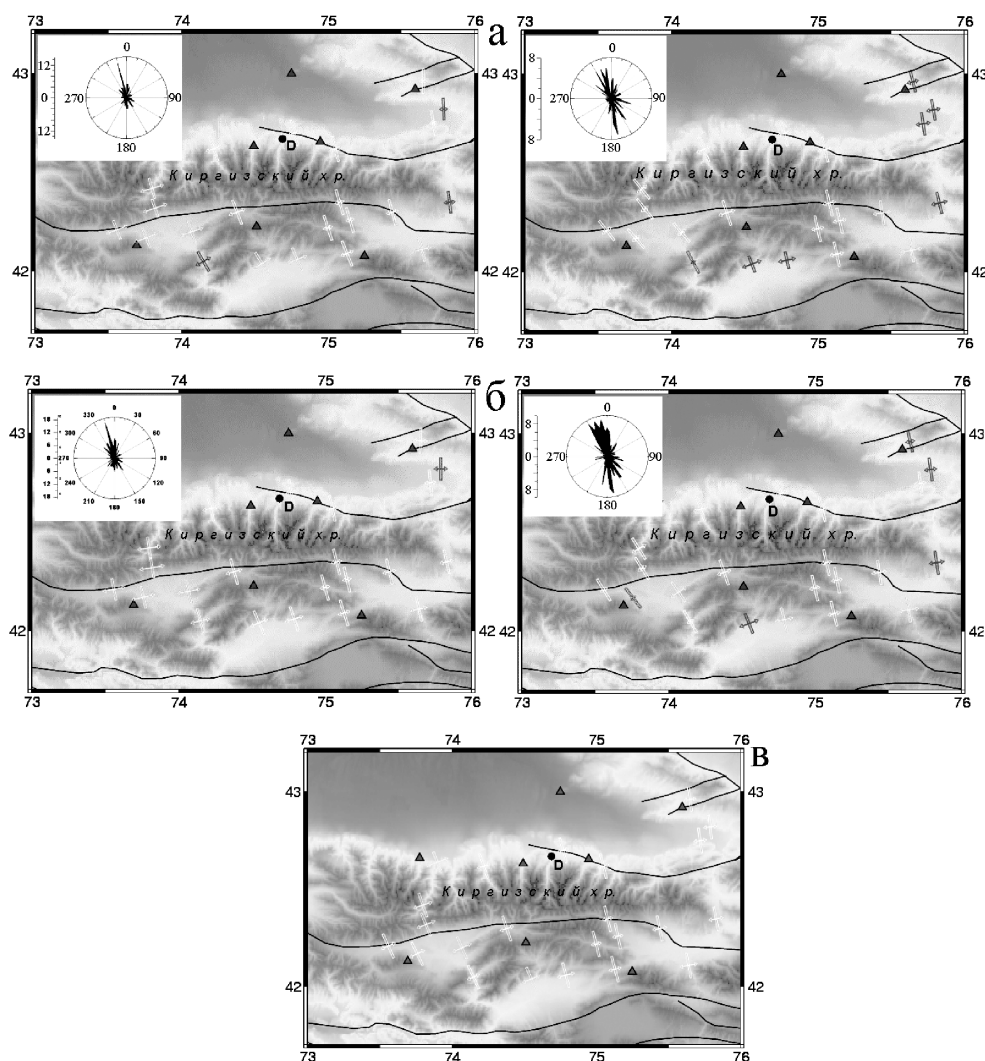


Рис. 5. Карты СТД: (а) – по сейсмичности 10 дней до и после ЭВ; (б) – сейсмичности до и после ЭВ; (в) – всей сейсмичности.

Треугольниками обозначены станции сети KNET. Точка – местоположение диполя.
На врезках – распределение азимутов углов осей сжатия фокальных механизмов очагов

чается изменение азимутов осей сжатия – разворот от северо–северо-западного до ЭВ на северо-западное. Такой результат может быть обусловлен изменением состояния среды после воздействия, что отразилось на изменении режима СТД. Карта СТД, полученная по всем землетрясениям, которые произошли на исследуемой территории, представлена на рис. 5, в. Такой характер СТД представлен в вышеуказанной работе [Сычева и др., 2005], при этом использовались данные за 1994–2004 гг., то есть характер СТД не изменяется при разном наборе данных. А при разделении землетрясений на те, которые произошли до ЭВ и после, анализ показывает об изменении характера СТД.

На врезках рис. 5, а, б представлены диаграммы распределения азимутов осей сжатия фокальных механизмов очагов землетрясений по четырем выборкам, которые использовались при построении карт СТД. Эти диаграммы хорошо отображают диапазон изменения азимутов осей Р до ЭВ и после него. Отмечается узкий разброс этого угла (345°) для сейсмических событий до ЭВ (рис. 5, а, б слева) и расширение этого разброса после ЭВ (330–360°) (рис. 5, а, б справа).

Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сейсмологических данных

Воспользуемся аппаратом нелинейного анализа динамических систем для проверки того, что изменение сейсмического режима носит не случайный характер, и, что в период дополнительных воздействий процесс становится более детерминированным. Рассмотрим вариант, когда не требуется восстанавливать фазовую динамику системы. Подобные приемы были использованы в работе [Chelidze et al., 2006].

В [Eckmann et al., 1987] предложен метод, расширяющий возможности нелинейного анализа временных рядов и основанный на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности (повторяемости состояний). В отечественной литературе этот метод известен как метод построения математических моделей с использованием рекуррентных диаграмм. Рекуррентные диаграммы (recurrence plot, в дальнейшем RP) позволяют изучать многомерные процессы через отображение рекуррентностей траектории на двухмерную двоичную матрицу размером $N \times N$, в которой 1 (черная точка) соответствует повторению состояния при некотором времени i в некоторое другое время j , а обе оси координат являются осями времени:

$$R_{ij} = \Theta(\epsilon_i - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), i, j = 1 \dots N, \quad (1)$$

где N – длина ряда состояний x_i , ϵ_i – размер окрестности, $\|\cdot\|$ – норма.

Для анализа также использован каталог сейсмических событий за 1998–2008 гг., энергетический класс $K = 6,5 \div 10,5$. В качестве исследуемого параметра анализировались интервалы времени и расстояния между последовательными событиями. Использовались следующие параметры окрестности текущей точки: для временных интервалов – 40 мин (время события с точностью до минуты), а для расстояний – 10 км. Производился также и расчет совместных рекуррентных диаграмм по двум параметрам одновременно: по времени и по расстоянию:

$$R_{ij} = \Theta(\epsilon_x - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|) \cdot \Theta(\epsilon_y - \|\vec{y}_i - \vec{y}_j\|), i, j = 1 \dots N, \quad (2)$$

где: x_i – время, y_i – расстояние.

Результаты построений приведены на рисунках 6–8. Как видно из рисунков, сейсмический процесс во время проведения дополнительных ЭВ на территории Северного Тянь-Шаня становится более регулярным, что может быть проявлением детерминизма в реакции среды на зондирования мощными импульсами тока.

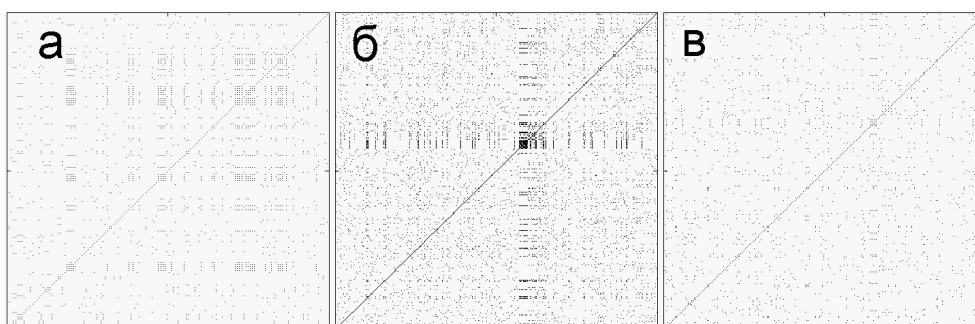


Рис. 6. Рекуррентные диаграммы по временным интервалам между событиями по каталогу KNET за 1998–1999 гг. (а), 2000–2005 гг. (б) и 2006–2008 гг. (в)

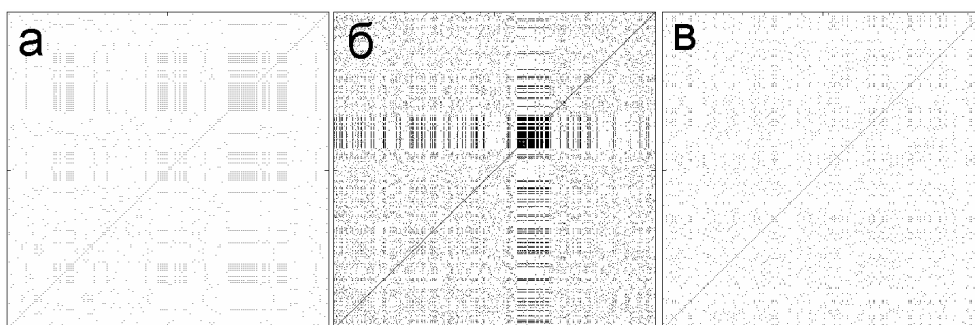


Рис. 7. Рекуррентные диаграммы по расстояниям между событиями по каталогу KNET за 1998–1999 гг. (а), 2000–2005 гг. (б) и 2006–2008 гг. (в)

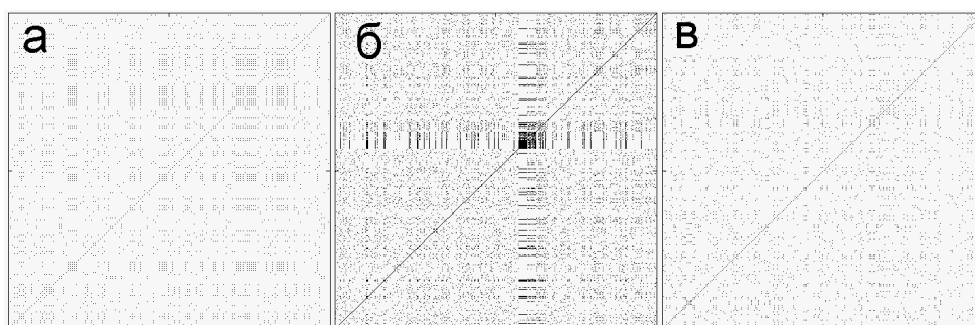


Рис. 8. Совместные рекуррентные диаграммы по временным интервалам и расстояниям между событиями по каталогу KNET за 1998–1999 гг. (а), 2000–2005 гг. (б) и 2006–2008 гг. (в)

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 в качестве откликов на ЭВ. Кроме того, получены новые результаты, которые могут иметь принципиальное значение для концепции «энерговоздействий». Одним из них является обнаружение в кумулятивных распределениях суточного числа событий чередующихся изменений для выборок событий слабых и умеренных энергий. Формально, «прореживание» событий классов 10,5–13 вслед за приростом числа слабых землетрясений ($6,5 < K < 10,5$) выглядит как признак частичной разрядки напряжений после ЭВ. Но в условиях, когда количество «вызванных» слабых событий относительно невелико (по оценкам, основанным на графиках энергетических распределений (рис. 1) это порядка 40 событий, то есть 2,5% их общего числа) вряд ли возможно обнаружить проявления такой разрядки в реальном времени.

Настоящее исследование осуществлено при финансовой поддержке РФФИ (гранты 09-05-00687а и 10-05-00231-а).

Литература

- Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н. Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий. – Екатеринбург: УрО РАН. 2007. 415 с.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС / Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. – Душанбе: Дониш. 1987. С. 101–119.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Изд. Наука. 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А. Напряженное состояние земной коры Бишкекского геодинамического полигона по данным сети KNET // Тезисы докладов Четвертого Международного Симпозиума: Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы». – Бишкек. 2008. С. 378–381.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Отв. ред. Макаров В.И. М.: Научный мир. 2005. 400 с.
- 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. Института горного дела СО РАН. 2008. С. 179–188.
- Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А. Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) // Физика Земли. 2005. № 11. С. 62–78.
- Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. 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 // Вулканонология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–160.

Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу. // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255.

Chelidze T., De Rubeis V., Matcharashvili T., Tosi P. Influence of strong electromagnetic discharges on the dynamics of earthquake time distribution in the Bishkek test area (Central Asia) // Annals of Geophysics. 2006. V. 49. N. 4/5. P. 961–975.

Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // Europhysics Letters. 1987. V. 5. P. 973–977.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ, ВАРИАЦИИ УРОВНЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА И СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов¹, В.Н. Сычев

Научная станция РАН в г. Бишкек,

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

В работе продолжено исследование вопроса о взаимосвязи сильных магнитных бурь, вызванных солнечными вспышками, и вариаций сейсмичности. Используются данные о временных зависимостях параметров сейсмического шума (среднего уровня, среднеквадратичного отклонения, СКО), регистрируемого станциями сейсмической сети KNET (Северный Тянь-Шань). Отмечены проявления влияния магнитных бурь, произошедших после сильных и сверхсильных солнечных вспышек в 2000–2006 гг. Полученные результаты согласуются с результатами работ о связи сейсмичности с магнитными бурями.

Введение

К настоящему времени наличие определенного влияния солнечной активности на сейсмичность Земли можно считать установленным [Сытинский, 1985; 1989; Соболев и др., 2001; Закржевская и Соболев, 2004]. Тем не менее, сохраняет актуальность поиск и анализ новых примеров, в которых проявляется влияние на сейсмичность активности Солнца, в частности, геоэффективных солнечных вспышек, сопровождающихся магнитными бурями с резким началом. Об этом свидетельствуют следующие обстоятельства. В обобщающих работах [Соболев и Пономарев, 2003; Сычев, 2008] обращено внимание на сходство изменений сейсмичности при возбуждении в земной коре импульсных токов, возбуждаемых естественными (магнитные бури) и искусственными источниками. По всей видимости, это соответствует общности механизма триггерного воздействия электромагнитных полей. В ситуации, когда проведение новых экспериментальных электромагнитных зондирований с мощными источниками (геофизические магнитогидродинамические (МГД) гене-