

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТРУКТУР БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

© 2012 г. А. В. Новопашина, В. А. Саньков, В. Ю. Буддо

*Институт земной коры СО РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
e-mail: anek@crust.irk.ru*

Поступила в редакцию 31.10.2011 г.

В эпицентральной зоне землетрясений Байкальской рифтовой системы (БРС) выделены отдельные участки со стабильной концентрацией сейсмических событий, являющиеся отражением развития во времени деформируемых сейсмогенерирующих объемов тектоносферы — сейсмических структур. Закономерности взаимосвязи и взаимодействия сейсмических структур, выявляемые на основе анализа пространственно-временных характеристик сейсмического процесса, характеризуют современную динамику БРС. По временным рядам сейсмических структур за период 1964–2002 гг. с использованием параметров: количество землетрясений (N) и логарифм суммарной, выделившейся при землетрясении энергии ($\lg E_{\text{sum}}$), выполнен спектрально-временной анализ (СВАН), и для каждой сейсмической структуры определены доминирующие периодические составляющие сейсмического процесса. По результатам корреляционного анализа, проведенного с использованием параметра N , была определена очередность активизации сейсмических структур и выделены периоды синхронизации сейсмического процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение различных пространственно-временных особенностей развития сейсмического процесса в Байкальской рифтовой системе (БРС) на уровне взаимодействия ее отдельных структурных единиц, сейсмических структур, позволяет проанализировать закономерности течения сейсмического процесса. К таким закономерностям можно отнести периодичность, стационарность и особенности пространственно-временной взаимосвязи различных сейсмических структур, выражающихся в синхронности и очередности сейсмической активизации.

В статье приведены результаты спектрально-временного и корреляционного анализа, интерпретированные в пользу возможной динамической или парагенетической связи между изучаемыми структурами.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Понятие сейсмических структур. В наших исследованиях мы опираемся на концепцию “сейсмических структур”, выдвинутую К.Г. Леви [1987]. Сейсмические структуры — “геометризованные объемы литосферы, включающие в себя очаги сильных землетрясений” [Леви, 1987]. В работе [Саньков и др., 1991] они определяются как объемные, развивающиеся во времени геологические тела, в которых происходят образования раз-

рывов и быстрые смещения по ним, фиксируемые в виде землетрясений. Сейсмоактивные структуры отражают напряженно-деформированное состояние и современные процессы разломообразования в земной коре.

В плане структуры сейсмичности выделяются по плотностным аномалиям на карте плотностей эпицентров, построенной с помощью сети шестиугольных ячеек (сот), размер которых соизмерим с точностью определения эпицентров (0.1°). В каждой из ячеек были получены значения логарифма общего количества землетрясений за исследуемый период. Границы структур изменчивы и привязаны к рассматриваемому интервалу времени.

Во всей Байкальской сейсмической зоне было выделено 26 сейсмических структур (рис. 1). Путем объединения данных по ячейкам, которые визуально можно отнести к одной зоне, были сформированы выборки данных для анализа.

Расчет пространственно-временных характеристик сейсмичности производился с использованием каталога землетрясений по данным БФ ГС СО РАН за инструментальный период наблюдений с 1964 по 2002 гг. с учетом представительности данных. Согласно графикам повторяемости землетрясений, составленным за периоды 1960–1964 гг. и 1964–1970 гг., за инструментальный период 1960–1964 гг. для всей территории Прибайкалья, данные представительны только с 12-го класса, а с 1964 г. данные представительны с 8-го

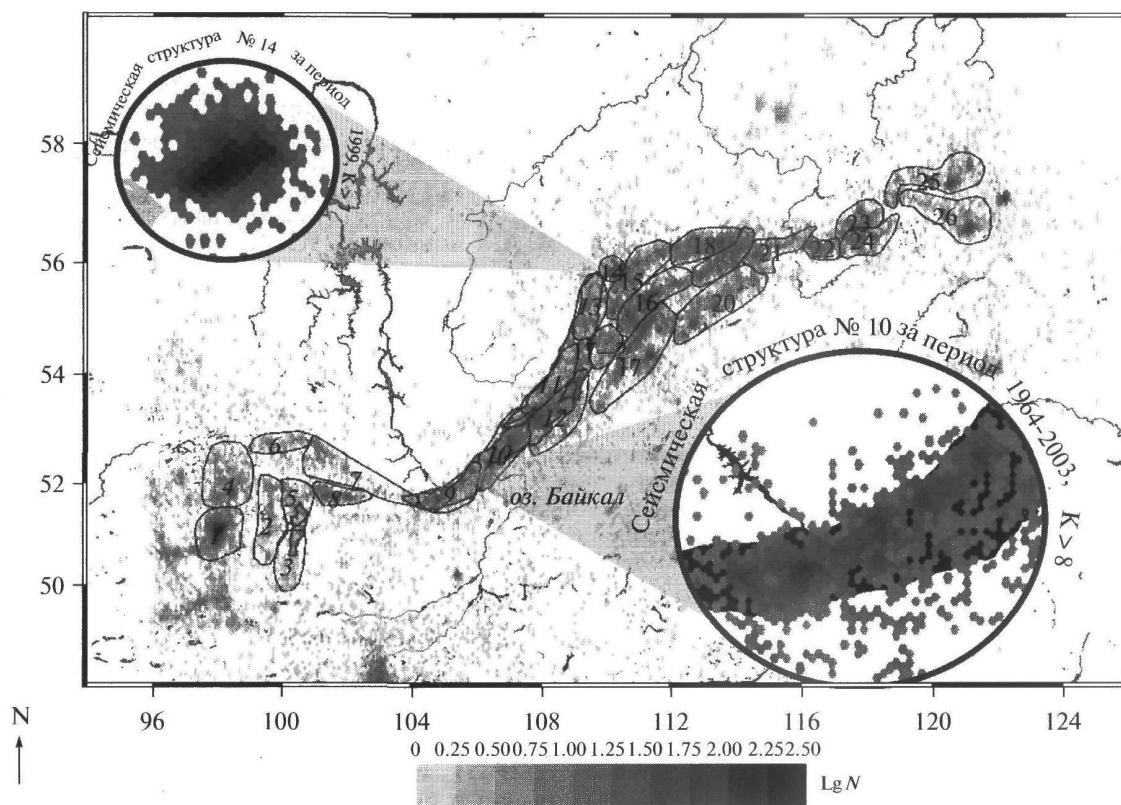


Рис. 1. Сейсмические структуры Байкальской рифтовой системы с их номерами.

класса. Согласно карте представительности землетрясений Прибайкалья за 1970 г. [Голенецкий, 1973], данные представительны с 7–8 класса. Поэтому в выборки данных для анализа вошли данные с 1964 г. выше 8-го класса.

Выделение периодичностей в сейсмическом режиме сейсмоактивных структур. Поиски периодичности в сейсмическом режиме БРС, осуществляемые методом спектрального анализа, производились различными исследователями [Дядьков, Егоров, 2000; Дядьков, 2002; Леви, 1997; Лукк, 1996; Любушин и др., 1998; Ружич, 1994 и др.]. Многократно предпринимались попытки выявить связь сейсмических режимов отдельных сейсмичных регионов планеты, а также БРС с внешними космическими воздействиями и внутренней динамикой Земли [Дядьков, Егоров, 2000; Козлов, Крымский, 1993; Кропоткин, 1970; Ламакин, 1966; Леви и др., 2003; Любушин и др., 1998; Ружич, 1994; Шерман, Горбунова, 2007].

На сегодняшний день существуют различные методики спектрального анализа [Андерсон, 1976; Канасевич, 1985; Марпл, 1990; Никитин, 1986], сокращенно — МСА: коррелограммный МСА [Марпл, 1990], периодограммный МСА [Марпл, 1990], спектрально-временной анализ

как разновидность оконного преобразования Фурье — СВАН [Козлов, Крымский, 1993], оценка спектральных параметров методом максимального правдоподобия [Любушин и др., 1998], а также метод вейвлет-анализа [Астафьева, 1996]. В данной работе приведены результаты, полученные методом спектрально-временного анализа (СВАН), позволяющие анализировать нестационарные процессы, каковыми являются временные ряды параметров сейсмического режима: количество землетрясений (N) и логарифм суммарной выделившейся энергии ($\lg E_{\text{sum}}$).

СВАН-диаграмма (СВАН-карта, или сванограмма) представляет собой трехмерную диаграмму с осями частоты, времени и спектральной плотности мощности (СПМ). Спектр временного ряда сейсмического процесса может выступать одной из характеристик сейсмического режима, свойственного той или иной сейсмоактивной структуре, а по СВАН-диаграмме можно судить об изменении спектра сейсмического режима во времени.

Данные о землетрясениях были суммированы в интервале времени один сидерический лунный месяц (27, 32 суток), затем временные ряды были интерполированы методом сплайн-интерполя-

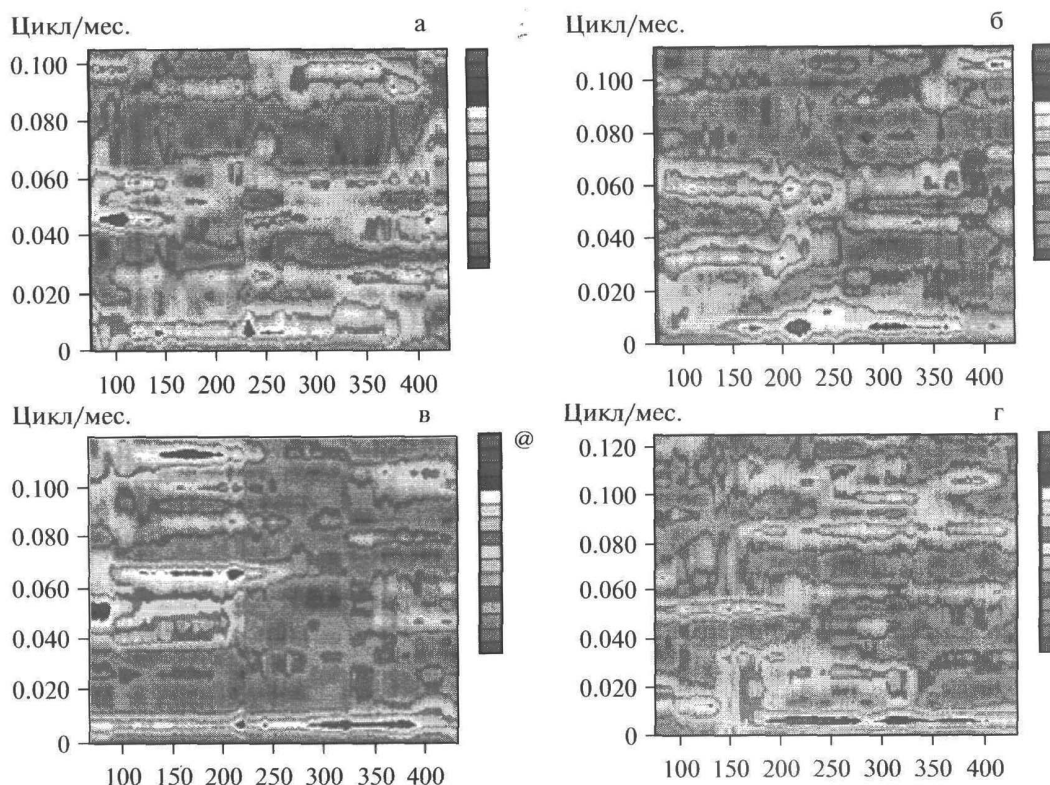


Рис. 2. СВАН-диаграммы временных рядов N сейсмических структур: а – для структуры 8 (по параметру $\lg E_{\text{sum}}$); б – для структуры 9 (по параметру $\lg E_{\text{sum}}$); в – для структуры 12 (по параметру N); г – для структуры 17 (по параметру N).

ции. Размер временного окна составляет $1/3$ от длины всего временного ряда инструментальных наблюдений для обеспечения хорошего частотного разрешения. Погрешность расчетных периодов составляет 0.3 года. Авторами данной работы при проведении СВАН было проанализировано 26 СВАН-диаграмм параметра N и 26 диаграмм параметра $\lg E_{\text{sum}}$.

Анализ СВАН-диаграмм параметров N и $\lg E_{\text{sum}}$ показал, что в целом сейсмический процесс не является стационарным (рис. 2). Но частотный состав некоторых структур характеризуется наличием гармоник с хорошей частотной локализацией, длительность пиков которых близка к периоду наблюдений у временных рядов некоторых сейсмоактивных структур со стабильно высокой активностью. Пики спектральной плотности этих гармоник (частоты 0.006–0.008) зачастую имеют наивысшие значения относительно других частотных составляющих на большом временном интервале. Периоды этих гармоник: 9.5, 11 и 12.8 являются близкими к периодам 11-летнего солнечного триплета, или цикла Швабе [Леви, 1997], который представляет собой набор трех гармоник: 9.5, 10.9, 12.9 лет. Значения спектральной

плотности мощности (СПМ) гармоник, близких к гармоникам цикла Швабе, полученные по параметру N , повышена у структур 8, 12, 16, 19, 20, 21, 24. Но только для структур 8, 10, 12, 17, сейсмическая активность которых относительно стабильна и высока, выделенные гармоники можно считать квазистационарными компонентами сейсмического процесса (рис. 2). СВАН-диаграммы параметра $\lg E_{\text{sum}}$ показывают наличие гармоник, близких к солнечным, почти у всех структур БРС. Как и для параметра N , пики продолжительны лишь на некоторых структурах. Наряду с широко известными циклами, близкими к 11-летнему солнечному, по каждому из используемых параметров, для большинства структур уверенно выделены циклы с меньшими значениями периода, характеризующие режим сейсмичности Байкальской рифтовой системы: 7.5, 6.0, 3.7–5.5, а также 0.7–2.0. Продолжительность максимумов их спектральной плотности, как правило, не превышает 0.5 длины всего исследуемого периода. Гармоника 7.5 (частота 0.01) лет устойчива во времени, но данную спектральную компоненту нельзя назвать стационарной. Гармоника, значение периода которой близко к четырем (частота 0.02),

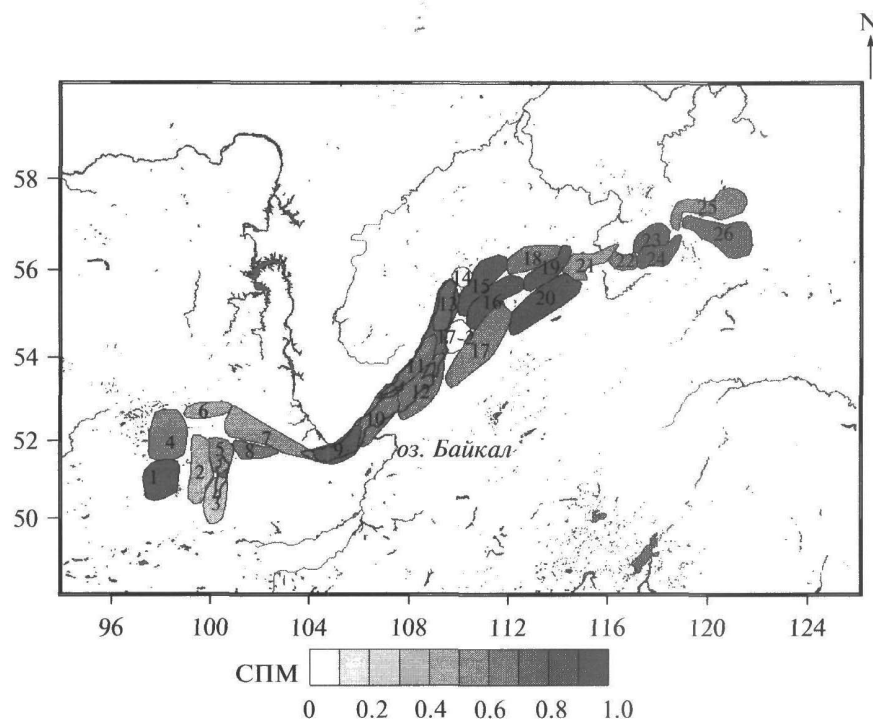


Рис. 3. Распределение спектральной плотности гармоник, близких к гармоникам одиннадцатилетнего солнечного цикла.

четко проявлена у многих структур, также четко выражена на сейсмоактивных объектах с фоновым сейсмическим процессом, например, у структур 11 и 22. Все выше указанные гармоники — это доминирующие спектральные компоненты, проявленные у большинства структур. На рис. 3 интенсивностью окраски полигонов показана СПМ гармоник, близких к гармоникам Швабе, полученная по параметру $\lg E_{\text{sum}}$.

Понижение значений спектральной плотности у высоко активных структур (1, 8, 10) может свидетельствовать об изменениях периодичностей, связанных с прохождением сильных землетрясений, сопровождаемых афтершоками, или роевых последовательностей, изменяющих спектральный состав сигнала. Например, для десятой структуры, находящейся в центральной части Байкала, характерны высокая сейсмическая активность, афтершоки и роевые события, а спектральная плотность гармоник, близких к 11-летним, полученная по количеству землетрясений, понижена относительно других структур. Вместе с тем результаты, приведенные в работе [Дядьков, 2002], анализировавшего 30-летние ряды тектономагнитного мониторинга центральной части Байкальской впадины, указывают на периодичность активизации землетрясений с магнитудой $M > 5$, которая близка к 11-летней периодичности солнечной активности.

Для структуры 1, которая является одной из самых активных, спектральная плотность гармоник, близких к 11-летним солнечным циклам, понижена по количеству землетрясений, хотя по параметру $\lg E_{\text{sum}}$ эти гармоники выделяются очень уверенно. Сильное Бусингольское землетрясение (27.12.1991, $M_{\text{LN}} = 6.5$), произошедшее в пределах этой структуры, сопровождалось огромным количеством афтершоков, что не позволило выделить указанные гармоники.

Корреляционный анализ сейсмических структур. Другим аспектом изучения сейсмического процесса является выявление пространственно-временных связей между различными структурами. Такая связь может быть определена по кривым взаимной корреляции (ВК) временных рядов. Она может быть прямой, отражающей геодинамическое взаимодействие сейсмоактивных объемов, а может быть косвенной или парагенетической. В первом случае может наблюдаться смещение максимумов корреляции во времени, во втором случае, если корреляция наблюдается без временного смещения, землетрясения близки по времени и могут быть вызваны влиянием какого-либо внешнего или внутреннего триггерного фактора, либо суперпозицией таких факторов.

Вероятностное распределение параметра N во времени является степенным [Нерсесов и др.,

1974]. Это требует использования непараметрических статистик, которыми являются коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кэндела. В данном случае была вычислена корреляция Спирмена:

$$r = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n^3 - n}, \quad (1)$$

где $d_i = x_i - y_i$.

Для коэффициентов корреляции была рассчитана значимость. Значимым коэффициентом корреляции является тот, для которого тестовая статистика отличия от нуля ξ больше табличного значения критической точки коэффициента Стьюдента t (при выбранной доверительной вероятности $\alpha = 0.05$) [Гмурман, 1979]. Применение коэффициента Стьюдента для ненормальных распределений является правомерным в случае расчета непараметрической тестовой статистики по формуле [Гмурман, 1979]:

$$\xi = t_{kp}(\alpha, k) \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}},$$

где r — текущий коэффициент ранговой корреляции, n — количество значений в выборке, $t_{kp}(\alpha, k)$ — критическая точка двусторонней критической области, которую находят по таблице точек распределения Стьюдента по уровню значимости α и числу степеней свободы $t = n - 2$ [Гмурман, 1979]. Из формулы видно, что чем больше измерений n , тем выше значение тестовой статистики ξ и вероятнее, что коэффициент значимо отличается от нуля (<http://www.statsoft.ru/home/portal/default.asp/>). Результаты ВК также зависят от длины интервала времени анализируемого ряда и порогового значения энергетического класса, ниже которого данные не включаются в выборку для анализа. Пороговое значение определяется нижним уровнем представительности землетрясений за период 1964–2002 гг. — $K = 8$.

Временные ряды были прокоррелированы двумя способами. Для получения общей картины статистической связи структур, отражающей очередность сейсмической активизации, за основу взят алгоритм, используемый Марплом [1990], в котором окно корреляции на первом шаге корреляции равно длине коррелируемых массивов и укорачивается при каждом последующем шаге на единицу. Корреляция производилась со смещением (шагом) один год. Предварительно параметр N суммировался за промежуток времени один год. Для выделения эпизодов синхронизации сейсмического процесса структур была использована методика корреляции без смещения. Такая методика была использована А.В. Ключевским [2007] для корреляционного анализа времен-

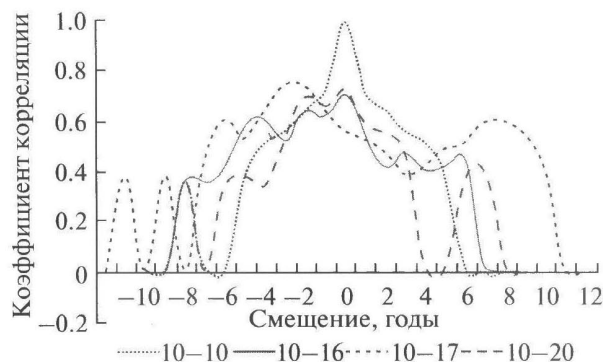


Рис. 4. Функции автокорреляции структуры 10 и взаимной корреляции структур 10–16, 10–17, 10–20, рассчитанные по методике с временным смещением.

ных рядов годовых чисел землетрясений различных сегментов БРС. Выборки временных рядов были получены путем суммирования параметра N за полугодовые периоды. Размер окна корреляции 10 является оптимальным, так как обеспечивает значимость значений функции взаимной корреляции и не является слишком большим для искусственного смещения статистических характеристик временных рядов в пределах окна. Эпизоды синхронизации сейсмического процесса были выделены по продолжительности непрерывных последовательностей значимых высоких коэффициентов кривых взаимной корреляции.

Для каждой комбинации пар временных рядов параметра N структур установлены значимые уровни ВК. Используемая методика корреляции со смещением позволила установить корреляционную зависимость со смещением во времени и выделить те сейсмоактивные структуры, которым свойственна поочередная активизация сейсмического процесса.

Результаты анализа показывают значимую статистическую связь между большим количеством исследуемых объектов. Преобладающее количество значимых коэффициентов корреляции, максимальных для корреляционных кривых, находится в диапазоне 0.4–0.5. В целом, на территории БРС выделяются группы структур, корреляционным кривым которых свойственно временное смещение.

Одна из зон высоких коэффициентов корреляций (до $r = 0.86$) включает в себя сейсмоактивные структуры центральной части Байкальской впадины 10 и 12 (рис. 4).

Смещения корреляционных максимумов между этими структурами нет, что говорит о синхронности их сейсмического процесса. Нет временного смещения между этой зоной и структурой 9, но

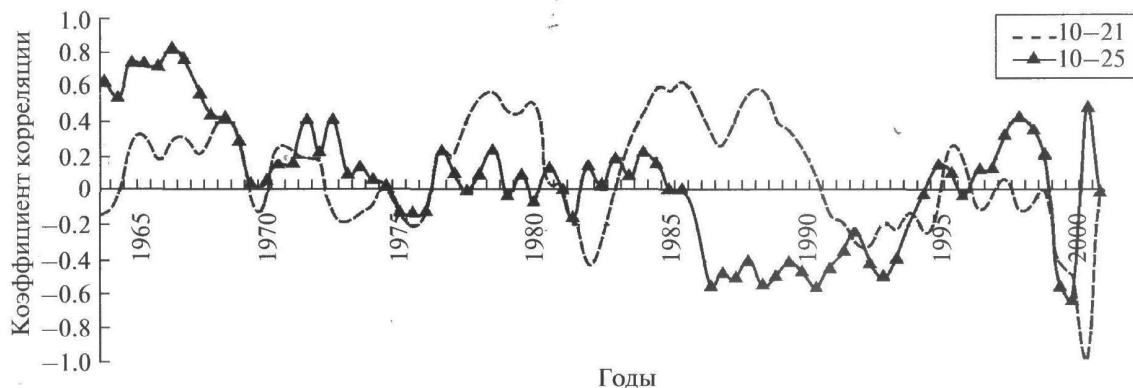


Рис. 5. Функции взаимной корреляции структур 10–21 и 10–25, рассчитанные по методике без временного смещения.

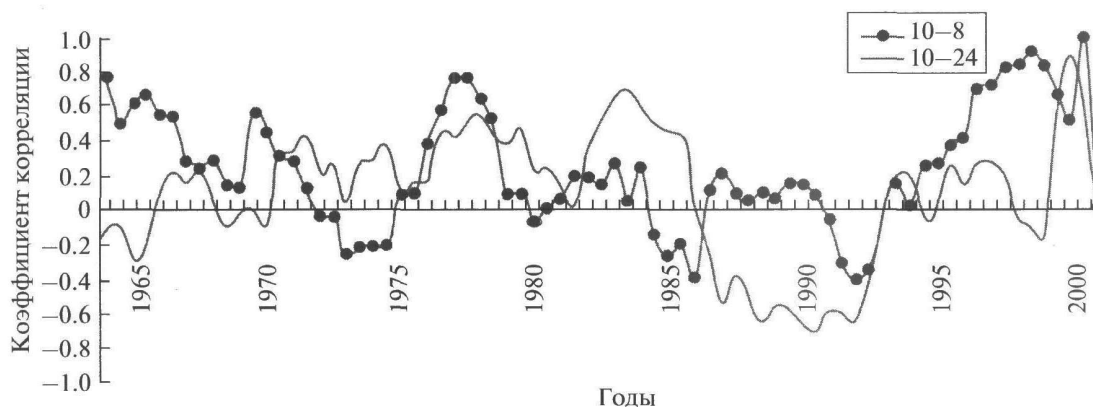


Рис. 6. Функции взаимной корреляции структур 10–8 и 10–24, рассчитанные по методике без временного смещения.

коэффициенты взаимной корреляции между 9–10 и 9–12 значительно ниже (см. рис. 4).

Структуры 5, 7, 9, 12, 15, 18, 20, 22, 24, 26 образуют группу высоких и средних корреляций как с небольшим временным смещением локальных корреляционных максимумов, так и с полным их совпадением.

Особенно явно выражена статистическая связь структур центральной части оз. Байкал и структур северо-восточного фланга БРС, для которых характерно смещение корреляционных максимумов до 4 лет в различных направлениях (см. рис. 4).

Корреляция совокупности структур северо-восточной зоны и структур 5, 6, входящих в указанную группу корреляций, имеет временное смещение (1–2 года) относительно зон 9, 10, 12, а также удаленных к северо-востоку структур 24 и 26. Последние, в свою очередь, коррелируют между собой без смещения. В целом, по функции ВК структур БРС, наблюдается общая тенденция смещения корреляционных максимумов как с северо-востока на юго-запад, так и в обратном на-

правлении. Высокие коэффициенты взаимной корреляции наблюдаются у пары структур 22–26. Для корреляционных кривых структур 22–11 и 22–13 наблюдается схожая динамика с небольшим смещением локальных корреляционных максимумов.

Очередность активизации, в некоторых случаях, может быть следствием динамического взаимовлияния соседних структур, проявляющегося, в основном, во временном интервале от одного до четырех лет. Либо, время реагирования среды на воздействие внешних факторов, провоцирующих сейсмическую активность, различается в разных частях Байкальского рифта ввиду различия локальных геодинамических условий.

По результатам взаимокорреляционного анализа, проведенного по методике без смещения, для сейсмических структур выделяются множественные эпизоды синхронизации продолжительностью от двух до восьми лет (рис. 5, рис. 6).

Корреляция, продолжительностью более года, характеризуется значимыми высокими положительными коэффициентами: от 0.65–0.7 до 0.9–1.0.

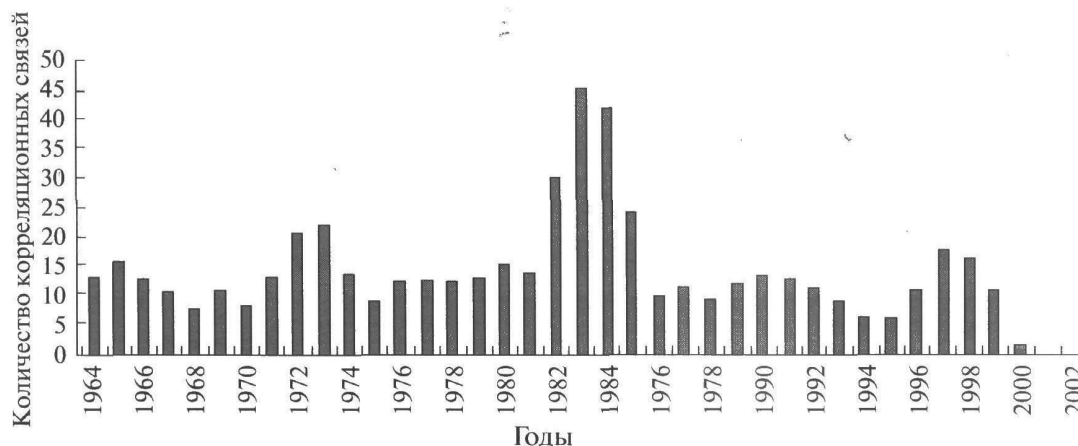


Рис. 7. Количество корреляционных связей по значимым положительным коэффициентам корреляции.

За каждый год за период 1964–2002 гг. было подсчитано количество высоких (>0.7) значимых корреляционных связей. Гистограмма этого параметра приведена на рис. 7. На гистограмме четко видна периодичность синхронизации сейсмического процесса. Время промежутков между максимумами (1965, 1973, 1983, 1990, 1997) 7–11, в среднем, 9 лет.

Максимум, приходящийся на начало 1980-х годов, обусловлен общим увеличением скорости сейсмического потока в этот период сразу во всех частях БРС. По результатам А.В. Ключевского [2007] самый выдающийся максимум синхронизации юго-западного, центрального и северо-восточного районов БРС также приходится на начало 1980-х годов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Периодичность сейсмического процесса и взаимная корреляция без смещения во времени могут быть обусловлены совместным влиянием триггерных факторов — внешних, планетарных, тектонических, а также локальных, изменяющих скорость сейсмического потока. В работе [Лукк и др., 1996] автор четко описал механизм действия триггерных факторов: “В отличие от устойчивых равновесных систем сложные неравновесные динамические системы оказываются очень чувствительными к малейшим изменениям внутренних параметров, флуктуации которых могут быть обусловлены крайне незначительными изменениями характера внешних воздействий. Отсюда, в частности, следует принципиальная возможность существования триггерных эффектов в геофизических процессах”. К основным внешним триггерным факторам относят солнечную активность и воздействие Луны [Дядьков, 2002; Ламакин, 1966]. В работе [Леви, 2003] рассмотрены возмож-

ные цепи последовательного опосредованного влияния Солнца на Землю в системе Солнце-Земля. Например: “Солнце → солнечный ветер → магнитосфера Земли → верхняя атмосфера → нижние слои атмосферы и гидросфера → литосфера”, что, возможно, является причиной схожести продолжительностей гармоник геологических процессов с солнечными циклами, но различие в их фазах. Проявления влияния Солнца и Луны многообразны, их изучение связано со всем предметным комплексом геофизики. Некоторые исследователи считают, что гравитация является одним из важнейших триггерных факторов. Например, В.В. Ламакин [1966] предполагает, что периодичность байкальских землетрясений заключается в приливно-отливном расшатывании земной коры, зависящем от Луны и Солнца, причем гравитационное влияние Луны в 2.17 раз больше, чем Солнца. Напряжения в земной коре, создаваемые каждым приливом в отдельности, в сотни раз слабее тех, которые сами по себе могли бы вызывать землетрясения. Но там, где земная кора выведена из тектонического равновесия, приливы, действуя в течение длительного времени, могут способствовать возникновению в ней разрывов и смещений, и, следовательно, землетрясений. Приливы также служат лишь дополнительными или, так называемыми, спусковыми силами, вызывающими землетрясения. Вместе с тем, Солнце и Луна влияют на многие другие природные процессы на Земле, которые, в свою очередь, влияют на сейсмичность. В ряде работ также установлена приуроченность сильных землетрясений во времени к различным космическим явлениям. Возникновение землетрясений связывается, например, с положением Луны [Ламакин, 1966], Солнца [Леви, 2003], прохождением комет [Войцеховский, 1990; Кобори, 1981], вспышками новых звезд [Yu, 1985], изменением секторной структуры межпланетного маг-

нитного поля [Ни, 1982], магнитных бурь. Триггерное воздействие на процессы подготовки землетрясений могут оказывать взаимодействие магнитосферы Земли с корпускулярными потоками, возникающими в периоды хромосферных вспышек на солнце, и различные атмосферные процессы. Высказывалась гипотеза, что перестройка термобарических полей является необходимым условием возникновения землетрясений. Подтверждением возможности подобной взаимообусловленности могут служить сообщения последних лет об экспериментально наблюдавшейся связи между резкими перепадами атмосферного давления и повышением уровня сейсмичности и вулканизма. К планетарным триггерным факторам, влияющим на режим сейсмичности, можно отнести нутации полюса вращения Земли, которые коррелируют с сейсмическим режимом в глобальном масштабе [Котляр, Ким, 1994]. Есть факты, позволяющие допускать влияние удаленных межплитных взаимодействий на ход сейсмического процесса в БРС, которые относятся к тектоническим триггерным факторам. Согласно [Ружич, 1994], в пространственно-временном распределении сильных землетрясений между Памирской частью зоны Индо-Евразийской коллизии и Байкальским рифтом, наблюдается закономерная миграция эпицентров. В [Леви, 1997] показано, что фазы сейсмической активизации в БРС и Западно-Тихоокеанской зоне поддвига проявляются со смещением на 10–15 лет. По мнению С.И. Шермана, триггерными механизмами активизации зон разломов рифтовой системы в реальном времени являются медленные деформационные волны [Шерман, 2005; Шерман, Горбунова, 2007], появление которых можно связывать как с внешним воздействием на рифтовую систему, так и с внутренними процессами в ней. К локальным тектоническим факторам, обуславливающим вариации современной активности тектонических движений, и, следовательно, сейсмической активности, относят подъем аномального мантийного вещества к подошве литосферы и ее деформирование [Ружич, 1994] в пределах изучаемой территории. Вместе с тем не ясен возможный механизм быстрых (годы и десятки лет) вариаций термогравитационных процессов, которые лежат в основе представлений о формировании мантийных диапиров, плюмов и тому подобных аномалий в мантии. К локальным факторам, безусловно, относятся сезонные изменения уровня оз. Байкал, которые, по мнению А.М. Попова [Popov et al., 2000], а также П.Г. Дядькова и В.И. Егорова [2000], вызывают изменения сейсмического режима в центральной части Байкальской впадины. Результаты корреляционного анализа по количеству землетрясений простран-

ственно согласуются с результатами спектрального анализа. Для сейсмических структур, между которыми получены значимые значения коэффициентов корреляции без смещения, плотность гармоник, близких к гармоникам солнечного триплета по параметрам N и IgE_{sum} , повышена и близка по значению к таковой на коррелирующих структурах. Это может послужить еще одним из доказательств того, что фактор солнечной активности является значимым триггером, провоцирующим сейсмичность в БРС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доминирующие циклы сейсмичности характерны для всех частей БРС, для структур с разной сейсмической активностью и различным соотношением сильных и слабых событий. Выделенные спектральные компоненты едины для большинства сейсмических структур, но проявляются на разных промежутках времени инструментального периода. Только у сейсмоактивных структур центральной части оз. Байкал и близко расположенных структур юго-западного и северо-восточного фланга БРС сейсмический процесс характеризуется наличием квазистационарных компонент.

Различные методики корреляционного анализа позволили извлечь информацию о связи отдельных частей БРС. Методика корреляции с временным смещением позволила установить, что процесс развития сейсмоактивных структур центральной части оз. Байкал не имеет временного смещения в рассматриваемом временном масштабе. Это может означать, что механизм функционирования структур данной области может зависеть либо от воздействия неких факторов, не связанных с механическим взаимодействием структур, либо геодинамическое взаимодействие происходит гораздо быстрее видимого на кривых ВКФ временного смещения. Изучить эту проблему позволяет пространственно-временная развертка сейсмического процесса, результаты которой приведены далее. Результаты корреляционного анализа без временного смещения показывают увеличение степени статистической связи между большинством сейсмических структур через определенные промежутки времени. Периодичность сейсмического процесса, выявленная по результатам СВАН, проявляется и в периодичности синхронизации, выявленной по результатам взаимокорреляционного анализа без смещения. Это дает основания предполагать воздействие на литосферу некоего фактора, влияющего сразу на все сейсмоактивные структуры одновременно. Реакция среды на это воздействие не является одномоментной, но проявляется в ограниченном временном интервале.

Исходя из результатов корреляционного анализа, проведенного без временного смещения и фактов, представленных в работах вышеуказанных исследователей, можно сделать вывод, что наиболее вероятным фактором из рассмотренных выше, является солнечная активность, определяющая периодичность и синхронность сейсмического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 774 с.
- Астафьева Н. Вейлет анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. № 11. С. 11–45.
- Войцеховский А. И. Виновница земных бед. М.: Знание, 1990. 48 с.
- Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высшая школа, 1979. 400 с.
- Голенецкий С. И., Букина К. И., Новомейская Ф. В. и др. Землетрясения Прибайкалья // Землетрясения в СССР в 1970 году. М.: Наука, 1973. С. 124–145.
- Дядьков П. Г., Егоров В. И. Мониторинг в квазиреальном времени гелиогеодинамических факторов в районе Южного Байкала // Солнечная активность и ее земные проявления. Тезисы докладов конференции, посвященной памяти Г. В. Кукулина. Иркутск, 2000. С. 76–77.
- Дядьков П. Г. Периодичность в изменениях сейсмического режима и напряжений в земной коре Байкальской рифтовой зоны: связь с 11-летней цикличностью солнечной активности и сезонными изменениями уровня оз. Байкал // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус–К, 2002. 672 с.
- Канасевич Э. Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. М.: Недра, 1985. 400 с.
- Ключевский А. В. Корреляция скорости потока землетрясений в литосфере Байкальской рифтовой зоны // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. Т. 1. С. 102–104.
- Кобори С. Кометы и землетрясения // Jishin To Yochi. 1981. V. 8. № 2. Р. 5.
- Козлов В. И., Крымский П. Ф. Физические основы прогноза катастрофических геофизических явлений. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1993. 164 с.
- Котляр П. Е., Ким В. И. Положение полюса и сейсмическая активность Земли. Новосибирск: ОИГГиМ СО РАН, 1994. 123 с.
- Кропоткин П. Н. Возможная роль космических факторов в геотектонике // Геотектоника. 1970. № 2. С. 30–46.
- Ламакин В. В. Периодичность байкальских землетрясений // Докл. АН СССР. 1966. Т. 170. № 2. С. 410–413.
- Леви К. Г. Сейсмические структуры литосферы и тектонические движения // Актуальные проблемы современной геодинамики и глубинного строения территории СССР. Тезисы докладов XX Всесоюзного тектонического совещания. М., 1987. С. 9.
- Леви К. Г. Периодичность природных явлений в Прибайкалье и сейсмичность // Современная геодинамика и сейсмичность Байкальского рифта. Иркутск, 1997. С. 171–188.
- Леви К. Г., Задонина Н. В., Бердникова Н. Е. и др. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. 500-летняя хронология аномальных явлений в Сибири и Монголии. Кн. 2. Иркутск: ИрГТУ, 2003. 383 с.
- Лукк А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я., Сидорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
- Любушин А. А. (мл.), Писаренко В. Ф., Ружич В. Ф. и др. Выделение периодичностей в сейсмическом режиме // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 62–76.
- Марпл С. Л. (мл.). Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Нерсесов И. Л., Пономарев В. С., Кучай В. К. Особенности пространственного распределения сейсмического фона // Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М., 1974. С. 119–131.
- Ни Ф. Возможный астрономический фактор для возникновения больших сейсмических событий // Acta Geophys. Sin. 1982. V. 25. № 3. Р. 270–275.
- Никитин А. А. Теоретические основы обработки геофизической информации // Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 342 с.
- Петров А. В., Трусов А. А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной информации – КОСКАД 3D // Геофизика. 2000. № 4. С. 29–33.
- Ружич В. В. О современной периодичности и триггерных механизмах сейсмотектонической деструкции земной коры в Прибайкалье // Байкал и горы вокруг него: Тезисы докладов Межрегионального геоморфологического семинара. Иркутск, 1994. С. 40–41.
- Саньков В. А., Днепровский Ю. И., Коваленко С. Р. и др. Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона. Новосибирск, 1991. 111 с.
- Шерман С. И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесрочного прогноза землетрясений // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. С. 20–38.
- Шерман С. И., Горбунова Е. А. Количественный анализ современной активности разломов Центральной Азии и их триггерных механизмов // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Тезисы докладов Всероссийского совещания с международным участием. Иркутск, 2007. Т. 2. С. 195–203.
- Popov A. M., San'kov V. A., Lukhnev A. V. Estimation of the earth's crust strength in the Baikal rift region on mathematical modeling data and GPS-geodesy // Abstracts of 15th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Cabo Frio, Brazil, August 19–26, 2000. Cabo Frio, 2000. P. 134.
- Yu Z. Strong earthquakes. Novae and cosmic ray environment // XIX Intern. Cosm. Ray Conf., La Jolia, August 11–23: Conf. pap. 1985. V. 15. P. 529–523.

Space–Time Analysis of Earthquake-Generating Structures in the Baikal Rift System

A. V. Novopashina, V. A. San'kov, and V. Yu. Buddo

*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
128 ul. Lermontova, Irkutsk, 664033 Russia*

e-mail: sankov@crust.irk.ru

Abstract—The epicenter field of earthquakes that occur in the Baikal Rift System (BRS) was analyzed to identify certain areas that have stable concentrations of seismic events; these are reflections (in time) of deformable earthquake-generating volumes in the tectonosphere, or earthquake-generating structures. The patterns that are identifiable in the interrelationships and interactions of earthquake-generating structures as found by analysis of the space–time characteristics of the seismic process characterize the present-day dynamics of the BRS. Time series of earthquake-generating structures were analyzed for the 1964–2002 period using the following parameters: the number of earthquakes (N) and the logarithm of total energy released by the earthquakes ($\text{Lg } E_{\text{sum}}$). The tool was frequency–time analysis (FTAN), which revealed dominant periodic components in the seismic process for each earthquake-generating structure. We also used correlation analysis based on the parameter N to determine the order of activation for the earthquake-generating structures and to identify periods of synchronization in the seismic process.