

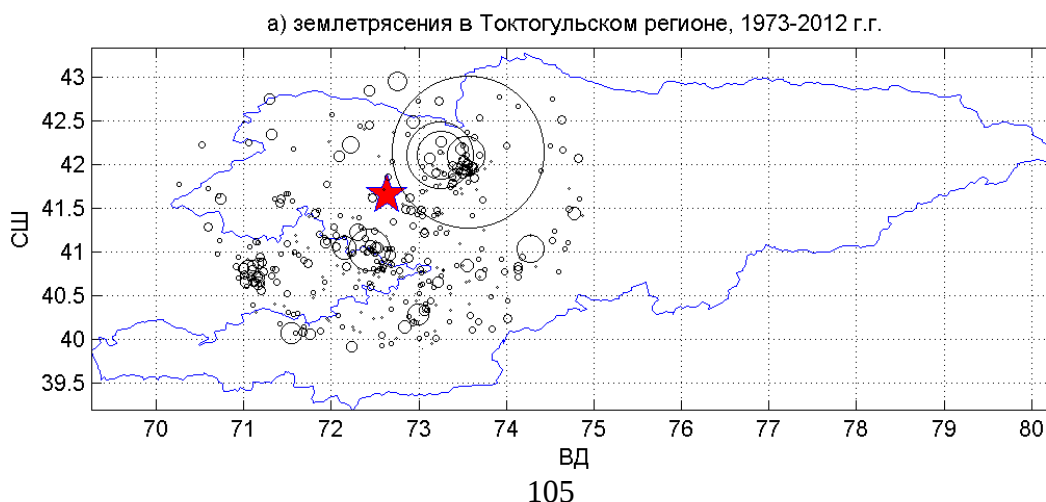
ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТОКТОГУЛЬСКОМ РЕГИОНЕ КР

Манжиков Б.Ц., Тилегенов К.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР, г.Бишкек

В процессе хрупкого разрушения геосреды при землетрясении упругая энергия, накопленная напряженной средой в области подготовки, переходит в тепло, энергию пластических деформаций, и в малой степени энергию сейсмических волн. Интенсивность сейсмических колебаний в данной точке земной поверхности зависит от гипоцентрального расстояния и энергии землетрясения. Эти величины, как и время возникновения, обычно являются предметом прогнозирования землетрясений.

Рассмотрим энергетический аспект прогнозирования на примере сейсмичности Токтогульского региона КР, где расположена одноименная ГЭС. Источником информации служил региональный каталог сейсмических событий, свободно доступный на сайте Геологической службы США.



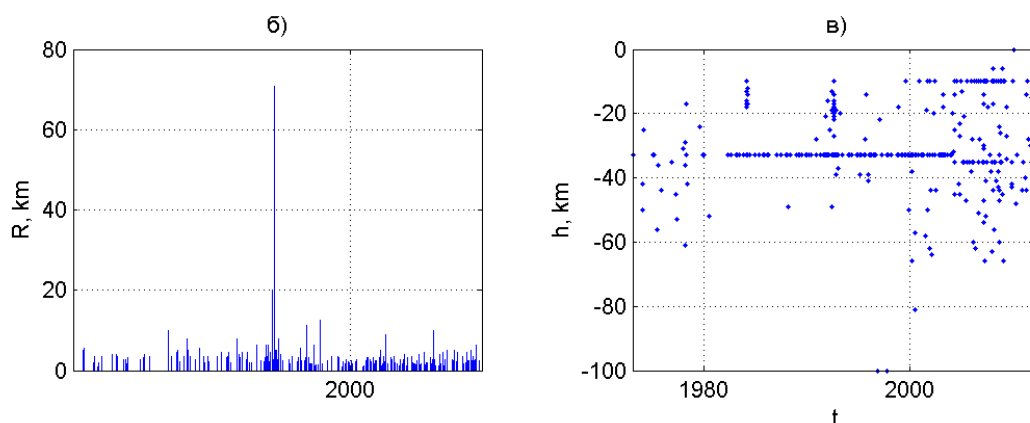


Рис. 1. а) карта эпицентров землетрясений в радиусе 200 км от Токтогульской ГЭС, б) последовательность сейсмогенных разрывов, в) распределение землетрясений по глубине.

В Токтогульском регионе КР ежегодно регистрируются сотни землетрясений магнитудой от 3 до 7. Эпицентры землетрясений, зарегистрированных в радиусе 200 км от Токтогульской плотины в 1973-2012 г.г., представлены на рис. 1а. Отдельным землетрясениям соответствует окружность радиусом, пропорциональным магнитуде: $R \approx 10 \cdot (0.5M - 1.8)$. Месторасположение Токтогульской ГЭС отмечено на карте звездочкой. Распределение сейсмичности в регионе весьма неравномерно. Большинство землетрясений происходит северо-восточнее и юго-западнее Токтогульской ГЭС в пределах Ферганской долины. Пространственно-временное распределение сейсмичности в целом отражает структурные особенности земной коры и неоднородность поля напряжений в регионе, сформировавшегося под влиянием активных тектонических нарушений, в частности, Талассо-Ферганского и Карасуйского разломов.

Большинство землетрясений, согласно представленному на рис. 1б распределению, происходило на глубинах до 100 км. Самое сильное, из зарегистрированных в указанное время, Суусамырское землетрясение магнитудой 7.3, произошло 19.08.1992 г. в 94 км северо-восточнее Токтогульской ГЭС. Очаг землетрясения находился на

глубине 27 км, и как большинство других землетрясений в регионе, был приурочен к границе Мохоровичича. На самой станции оно сопровождалось 7-балльными колебаниями и интенсивным камнепадом с окрестных горных склонов. Основные сооружения гидроузла во время землетрясения не пострадали.

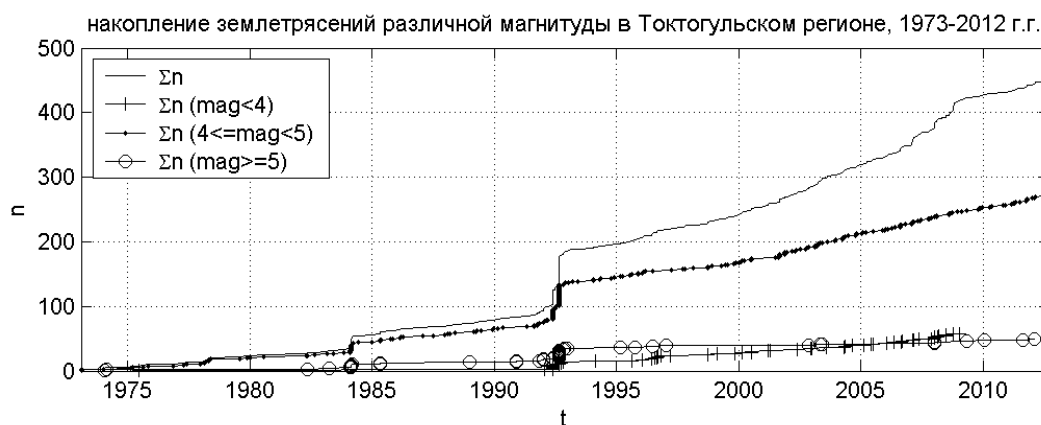


Рис. 2. Накопление землетрясений различной магнитуды в Токтогульском регионе.

Сейсмический режим Токтогульского региона представлен временным потоком сейсмических событий, зарегистрированных в период с 1973 по 2012 гг., которые изображены на рис. 1б в виде вертикального штриха высотой, пропорциональной магнитуде землетрясения, и кумулятивными зависимостями землетрясений различных магнитуд на рис. 2. Согласно последним, большинство землетрясений в регионе произошло во второй половине указанного периода, когда сейсмическая активность на юге Кыргызстана усилилась в связи с подготовкой и реализацией Суусамырского землетрясения 1992 года.

Временные флуктуации кумулятивных зависимостей наглядно демонстрируют региональные особенности сейсмического режима этого периода. Резкое увеличение их крутизны, пропорциональное скорости накопления числа землетрясений в регионе происходило трижды в 1978, 1984 и 1992 годах. Наиболее сильный скачек сейсмической активности

приурочен к Суусамырскому землетрясению 1992 года. В период подготовки, незадолго до этого землетрясения, наблюдалось увеличение числа и энергии относительно слабых и средней силы сейсмических событий. Высокая сейсмическая активность, обусловленная интенсивной разгрузкой очаговой области, сохранялась в регионе и после основного события в течение всего афтершокового периода, завершившегося дефицитом высокоэнергетических событий. Затем, спустя некоторое время, последовало очередное возрастание числа событий и увеличение их энергий.

Судя по кумулятивным зависимостям, после Суусамырского землетрясения фоновый уровень сейсмичности в регионе постепенно повышался вплоть до 2009 года за счет увеличения числа землетрясений магнитудой $M < 5$, что, вероятно, было связано с интенсивным перераспределением напряжений в регионе, вызванного этим землетрясением. Накопление же более сильных событий, менее чувствительных к кратковременным вариациям напряженно-деформированного состояния, происходило примерно с постоянной скоростью. Период активизации завершился серией землетрясений средней силы в 2008-2009 годах. Подобные изменения сейсмического режима наблюдались в это время не только в Токтогульском регионе, но и на остальной территории северного Тянь-Шаня. В целом особенности сейсмического режима, связанные с Суусамырским землетрясением, характерны для большинства сильных землетрясений в других регионах земли.

Обобщенной энергетической характеристикой сейсмического режима является распределение числа сейсмических событий по энергии или магнитуде. Ввиду чрезвычайно широкого энергетического диапазона сейсмических событий, составляющего несколько порядков, обычно рассматривается зависимость числа сейсмических событий от логарифма энергии (энергетического класса) или магнитуды:

$$N(M)=dn/M, \quad (1) \quad \text{где } M - \text{магнитуда.}$$

На рис. 3а показана гистограмма распределения по магнитуде землетрясений Токтогульского региона, зарегистрированных в 1973-2012 гг. Распределение представляет собой результат сортировки сейсмических событий по магнитуде с точностью 0.1. Оно имеет выраженный максимум для событий с магнитудой 4.4, число которых возрастает и убывает, соответственно, в области малых и больших значений магнитуд. Подобная форма распределения обусловлена, с одной стороны, пропуском энергетически слабых событий вследствие ограниченной чувствительности системы регистрации, с другой, естественным дефицитом сильных сейсмических событий. Последний обусловлен тем, что число сейсмических событий закономерно уменьшается с увеличением их энергии, так как трещины данного размера образуются путем слияния и последовательного укрупнения некоторого числа менее крупных дефектов.

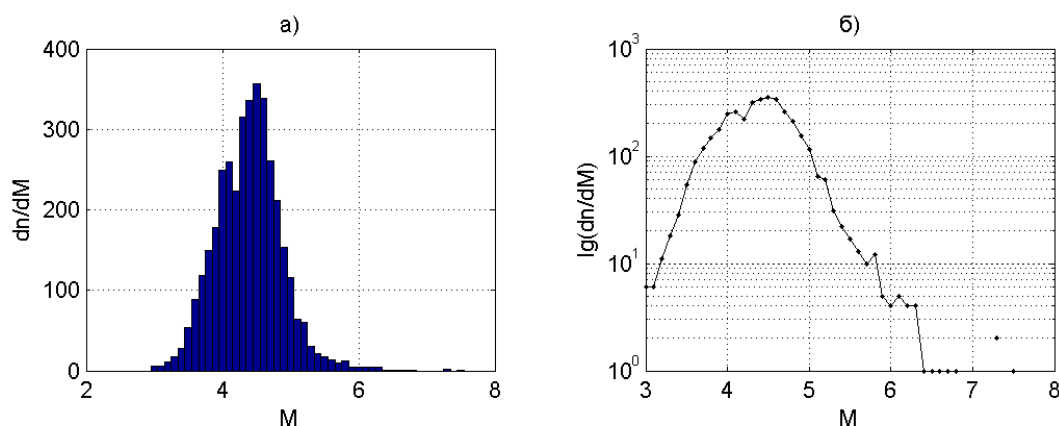


Рис. 3. а) распределение землетрясений Токтогульского региона по магнитуде, б) график повторяемости.

Аналогичное распределение числа землетрясений по энергии (магнитуде), построенное в двойных логарифмических координатах, или график повторяемости, является одной из важнейших статистических зависимостей в сейсмологии. Закон повторяемости землетрясений отражает вероятность возникновения землетрясений различной силы

(энергии). График повторяемости сейсмических событий Токтогульского региона приведен на рис. 3б.

Статистически представительная информация, соответствует линейному ниспадающему участку графика повторяемости, включая и нижний загиб. Для Токтогульского региона, согласно рис. 3б, статистически представительными являются землетрясения с $M > 4.5$.

$$\lg N = N_0 - \gamma M, \quad (2)$$

где N_0 – число событий нулевой магнитуды.

Угловой коэффициент γ , характеризующий наклон ниспадающей ветви графика повторяемости, отражает уменьшение частоты появления толчков различной магнитуды. Величина параметра γ зависит от свойств среды и закона деформирования (нагружения), при котором реализуется процесс разрушения [2]. Зависимость (2) имеет универсальный характер и справедлива в широком диапазоне энергий актов разрушения, включая процессы трещинообразования (акустическая эмиссия), горные удары (сейсмоакустика) и землетрясения.

Рядом авторов [1-5] отмечалось уменьшение наклона графика повторяемости перед макроразрушением образцов, горным ударом и сильным землетрясением, чему придавалось прогностическое значение. Выполаживание зависимости $N(W)$ перед образованием крупного разрыва указывает на то, что во время его подготовки интенсивное укрупнение разрывов происходит значительно чаще, чем при фоновом уровне сейсмического процесса, характерного для среднего, установившегося в данном регионе напряженно - деформированного состояния. Следовательно, выполаживание графика повторяемости перед образованием сравнительно крупного разрыва сплошности (подвижки) является характерным проявлением разрушения на различных масштабах от лабораторных образцов до горных ударов и землетрясений.

Согласно этим представлениям, крутизна графика повторяемости отражает степень сейсмоопасности данной территории и, следовательно, может служить её количественной характеристикой. Это неслучайно, если рассматривать сейсмичность как проявление некоторого результирующего свойства данной территории, сформировавшегося под влиянием множества факторов, таких как, структура и свойства горных пород, напряженно - деформированное состояние в регионе и т.д. Пологий график повторяемости соответствует повышенной сейсмоопасности территории, и напротив, более крутой, ее меньшей опасности в этом отношении.

Таким образом, крутизна графика повторяемости позволяет оценивать и сопоставлять сейсмоопасность различных регионов земной коры. Очевидно, это замечание относится и к различным периодам времени для одной и той же территории, если ее сейсмичность изменяются с течением времени. Так как угловой коэффициент графика повторяемости γ вычисляется для статистически представительных событий, то его величина является характеристикой сейсмичности инвариантной в аппаратурном отношении, которая может рассматриваться в качестве одного из ее потенциальных прогностических параметров.

С целью определения максимальной магнитуды и вероятности возникновения в Токтогульском регионе землетрясений различной силы в настоящей работе рассматривались характеристики обратного накопления сейсмических событий по магнитуде. Данная зависимость получается путем суммирования числа сейсмических событий по магнитуде, но не так, как это принято, например, при построении функции распределения случайной величины, начиная с малых значений, а в обратном порядке, начиная с наибольших значений энергий. Полученная таким образом зависимость напоминает известную функцию распределения, но построенную в обратном порядке.

Обратная функция распределения сейсмических событий по энергии уменьшается от 1 в области малых энергий, до 0 в области сравнительно высоких энергий. Ниспадающая область обратной зависимости накопления числа событий от магнитуды, достаточно точно аппроксимируется линейной зависимостью, аналогичной (2).

Приравняв нулю левую часть уравнения регрессии, аппроксимирующего зависимость обратного накопления статистически представительных сейсмических событий, достаточно просто вычислить максимальную магнитуду землетрясений,

$$M^* = N_0 / \gamma. \quad (4)$$

Для Токтогульского региона, согласно данным, приведенным на рис. 4а, она составляет ~ 7.4 .

Для прогнозирования максимальной магнитуды ожидаемого сейсмического события следует вычислять M^* для текущей реализации процесса в темпе поступления инструментальной информации. Данный параметр имеет предельно ясный физический смысл и может наряду с величиной γ рассматриваться в качестве еще одного прогностического параметра сейсмичности.

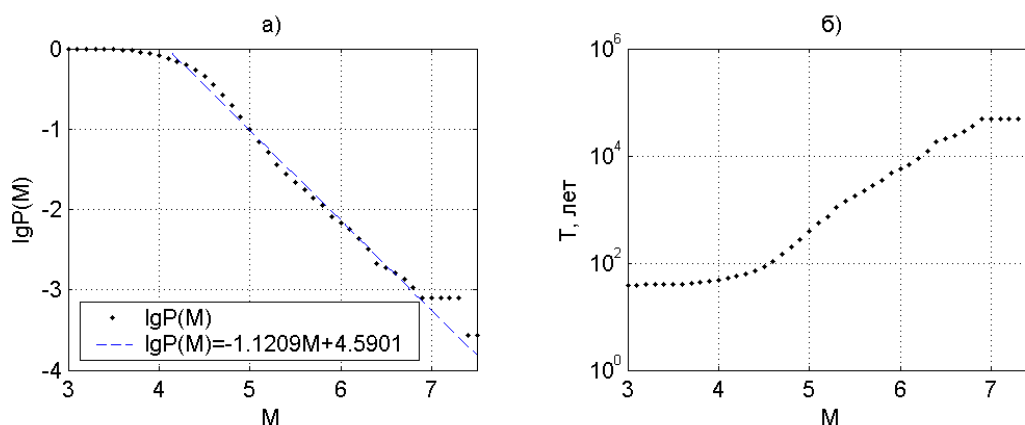


Рис. 4. а) вероятность возникновения и б) период повторяемости землетрясений различной магнитуды в Токтогульском регионе.

Для вычисления вероятности $P(M)$ возникновения землетрясений различной магнитуды достаточно отнести их количество, накопленное за

определенное время, к общему числу событий за тот же период времени. Зависимость вероятности возникновения землетрясений различной магнитуды и соответствующее уравнение регрессии, позволяющее рассчитать вероятность возникновения землетрясения данной магнитуды в регионе, приведены на рис. 4а. Период повторяемости землетрясений различной магнитуды в радиусе 500 км от Токтогульской ГЭС, рис. 4б.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мого К. Предсказание землетрясений: Пер. с англ.- М., Мир, 1988, 382 с.
2. Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений.- М., Наука, 1989, 177 с.
3. Манжиков Б.Ц., Мансуров В.А., Ружич В.В. Проявление нестационарности процесса разрушения горных пород в графиках повторяемости.// Всесоюзная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород».- Иркутск. 1988. с.79-81.
4. Мамадалиев Ю.А. Об исследовании параметров сейсмического режима во времени и в пространстве.// Вопросы региональной сейсмичности Средней Азии. Фрунзе. Илим. 1964.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения.- М.: Наука. 1988. 480 с.