

УДК 550.34

ПОИСК ТЕХНОГЕННЫХ ЭФФЕКТОВ В КАТАЛОГЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ГАРМСКОГО ПОЛИГОНА

© 2015 г. А.Я. Сидорин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Выполнены исследования по поиску техногенных эффектов в каталоге землетрясений высокогорного Гармского района Таджикистана. Территория района характеризуется малой плотностью населения и низким уровнем техногенных помех. Используются методы фазовой диагностики на основе сравнения данных о суточной периодичности землетрясений, относящихся к временным интервалам с разными фазами активности техносферы. Сравнивались данные, относящиеся к периодам действия летнего времени, когда часы были переведены на один час вперед, и данные, полученные в период действия зимнего времени. Предполагалось, что при наличии сильных техногенных эффектов фаза суточной периодичности должна скачком сдвигаться на час вперед при переходе на летнее время. Анализ осуществлялся с помощью периодограмм Ломба–Скаргла, метода наложения эпох, взаимного корреляционного анализа и фазовых диаграмм (годографов) Рэлея–Шустера. Несмотря на то что суточная периодичность в исследованном каталоге землетрясений выражена очень отчетливо, ни одним из использованных методов не удалось обнаружить искомого эффекта сдвига ее фазы при переходах на летнее время и обратно. Это можно объяснить большой погрешностью полученных оценок, низким уровнем техногенных помех и обусловленностью суточной периодичности землетрясений на Гармском полигоне природными процессами.

Ключевые слова: сейсмичность, Гармский полигон, техногенные эффекты, суточная периодичность, методы фазовой диагностики, переход на летнее время.

Введение

По мере развития техносферы природная среда подвергается все большему техногенному воздействию. При этом техногенные эффекты проявляются в самых разнообразных природных процессах, в том числе и в сейсмичности [Davies *et al.*, 2013; Mulargia, Bizzarri, 2014]. В каталогах землетрясений они могут быть разной природы. В частности, одна из наиболее серьезных проблем, затрудняющих изучение сейсмичности, – возможность наличия в каталоге реальных сейсмических событий, но не природных, а искусственных.

Это в первую очередь взрывы, которые в большом количестве проводятся при строительстве дорог и гидротехнических сооружений, разработках месторождений и некоторых других видах работ [Годзиковская, 1987, 2012; Сидорин, 2005а, 2007, 2011а, 2014; Gulia, 2009; Horasan et al., 2009; Kiszely, 2009, 2010; Журавлев, Лукк, 2011; Адушкин, 2013; Годзиковская, Прибылова, 2014]. Так, не идентифицированные взрывы составляли около 90 % всех сейсмических событий, содержащихся в каталоге землетрясений района строительства Нурекской ГЭС [Годзиковская, 1995].

Второй тип техногенных эффектов – это наличие в каталоге реальных землетрясений, индуцированных тем или иным воздействием на природную среду. Такими землетрясениями могут быть, например, афтершоки подземных ядерных взрывов [Адушкин, Спивак, 1991]. Более того, даже относительно небольшие взрывы могут приводить к увеличению количества и энергии землетрясений в их окрестности. Длительность периода техногенной «афтершоковой» активизации составляет примерно от 11 ч до 3 сут после взрывного воздействия на среду. При этом степень увеличения фоновой сейсмической активности зависит от энергии проводимых взрывов [Еременко и др., 2002, 2009].

Техногенные сейсмические события возникают при изменениях уровня водохранилищ, образованных у высотных плотин [Гунта, Расмоги, 1979; Gupta, 1992; Канустян и др., 1998; Mekawi et al., 2004; Kerr, Stone, 2009; Dura-Gomez, Talwani, 2010; Li et al., 2011], использовании геотермальных ресурсов [Deichmann, Giardini, 2009; Brodsky, Lajoie, 2013], эксплуатации месторождений углеводородов [Смирнова, 1977; Акрамходжаев и др., 1984; Grasso, Wittlinger, 1990; Зотов, Черных, 1992; Адушкин и др., 2000; Bardainne et al., 2008; Cesca et al., 2014], закачке в земные недра через скважины различных по составу флюидов [Evans, 1966; Healy et al., 1968; Hsieh, Bredehoeft, 1981; Cartlidge, 2014; Hand, 2014; Keranen et al., 2014; Rubinstein et al., 2014].

В последние годы серьезную озабоченность специалистов и общественности, особенно в США, вызывает резкий рост количества техногенных землетрясений в районах разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов, находящихся в расчлененных коллекторах, коллекторах малой мощности с низкими фильтрационными характеристиками. В США около 25 % всей добываемой нефти – нефть из нетрадиционных месторождений, а к 2030 г. такие месторождения станут, по некоторым оценкам, основным источником нефти для этой страны [Орлов, 2012]. Для разработки нетрадиционных месторождений повсеместно используется гидравлический разрыв пласта, который осуществляется с помощью закачки в скважину под высоким давлением, достигающим 100–150 МПа, жидкости разрыва. В результате этого процесса в породах создается протяженная трещина длиной до 600 или даже 1000 м, которая закрепляется в раскрытом состоянии с помощью расклинивающего агента – проппанта. По наиболее распространенной технологии, используемой, в частности, в США, после гидроразрыва отработанная жидкость удаляется из скважины для повторного использования или захоронения в специальных глубоких скважинах.

Техногенные землетрясения могут возникать при воздействии на залежи углеводородов методом гидроразрыва в результате: 1) образования протяженной трещины; 2) повышения порового давления в горных породах после проведения гидроразрыва; 3) захоронения отработанной жидкости разрыва. Энергия землетрясений, связанных с образованием главной трещины, невелика, их магнитуда не превышает значений $M = 3.6–3.8$ [Westaway, Younger, 2014]. Это обстоятельство используется некоторыми специалистами для обоснования точки зрения о несущественной опасности индуцированных землетрясений для техносферы и населения.

Однако количество этих землетрясений в центральной части США, где проводится интенсивная разработка сланцевых месторождений углеводородов с использованием гидроразрыва пластов, нарастает с пугающей быстротой. По данным работы [Ellsworth, 2013], оно оставалось в течение нескольких десятков лет на достаточно стабильном уровне – в среднем 21 землетрясение в сутки. Однако с 2005 г. начался резкий рост количества землетрясений и в 2011 г. среднее значение было превышено в 9 раз. Никто не знает, как будет развиваться этот процесс даже в ближайшем будущем, не говоря уже о более отдаленных последствиях. Кроме того, повышение порового давления в горных породах в результате применения гидроразрыва пласта и захоронения жидких отходов приводит систему разломов в критическое состояние, повышая опасность возникновения сильного землетрясения в результате даже незначительных триггерных воздействий [van der Elst et al., 2013].

Не все специалисты в США склонны считать наблюдаемый рост сейсмичности техногенным, допуская возможность его природного происхождения. В этих условиях Геологическая служба США подчеркивает необходимость объяснения механизма очень необычного роста сейсмичности и исследования возможности его связи с активизацией разработки месторождений углеводородов [Record..., 2014]. Для этого необходимо развить методы идентификации техногенных сейсмических событий.

Обсуждаемая проблема актуальна и для России, поскольку на ее территории, во-первых, тоже известны случаи возникновения землетрясений в связи с разработкой месторождений углеводородов [Адушкин и др., 2000], а во-вторых, в большом количестве используются методы интенсификации добычи углеводородов методом гидроразрыва пласта, в том числе многостадийного с бурением протяженных горизонтальных скважин. Пример нетрадиционных, трудноизвлекаемых запасов нефти – Баженовское месторождение, где значительная часть запасов нефти представлена керогеном. На этом очень крупном нефтяном месторождении экспериментально продемонстрирована значительная перспективность использования гидроразрыва пласта для повышения нефтеотдачи скважин [Калинин, 2012].

Модулировать поток слабых землетрясений могут и механические вибрации от различных техногенных и природных источников [Науменко, 1979; Садовский и др., 1981; Островский, 1990; Мирзоев, Негматуллаев, 1990]. С другой стороны, такие вибрации и естественный сейсмический шум могут формировать и кажущиеся, ложные изменения сейсмичности [Дещеревская, Сидорин, 2005]. Для исследования подобного эффекта модуляции сейсмичности важно понять природу модулирующего воздействия, выяснить, является оно естественным или техногенным. Такая задача возникает, в частности, при исследованиях суточной периодичности землетрясений.

Эффективным методом ее решения может быть изучение фазы суточной периодичности сейсмических событий, а именно, ее изменений при известных изменениях фазы техногенных воздействий. Весьма удобным для этих целей оказалось использование точно известных моментов перехода на летнее время весной и возврата к зимнему времени осенью [Сидорин, 2011а]. При переходе на летнее время характерный временной паттерн деятельности техносферы смещается на один час вперед относительно солнечного времени и времени по Гринвичу, поэтому в том случае, если суточная периодичность сейсмичности (не имеет значения, какая – истинная или кажущаяся) является техногенной, ее фаза должна сдвигаться на один час вперед, на более раннее время по Гринвичу. Осенью фаза должна возвращаться к ее исходному, зимнему значению.

К сожалению, результаты подобных исследований могут осложняться наличием сезонных изменений фазы суточной периодичности, не связанных с переходом на летнее

время. В работе [Сидорин, 2014] предложено обойти эту трудность, сравнивая фазу суточной периодичности сейсмических событий в годы, когда переход на летнее время осуществлялся, с соответствующей фазой в те годы, когда такого перехода не было. Однако найти каталог землетрясений с кондиционными данными для периода, когда не было перехода на летнее время, оказалось непросто.

Один из каталогов, удовлетворяющий требованиям обсуждаемого сопоставления суточной периодичности сейсмических событий, – Гармский каталог землетрясений. Выбор этого каталога для расчетов объясняется тем, что, во-первых, в течение последних 11 лет функционирования полигона (1981–1991 гг.) в стране ежегодно осуществлялся переход на летнее время и обратно, а во-вторых, в течение длительного времени, по крайней мере примерно с середины 1970-х годов, на полигоне происходили лишь незначительные изменения конфигурации сети сейсмических станций, что обеспечило довольно стабильный порог представительности землетрясений каталога в этот период [Сидорин, 2011б]. Кроме того, каталог характеризуется отчетливой суточной периодичностью, сопоставление фазовых характеристик которой может облегчаться наличием полуденного эффекта [Сидорин, 2005б].

Исходные данные и методы их анализа

Гармский геофизический полигон находился в Таджикистане в пределах средне- и высокогорья зоны сочленения Северного Памира, Южного Тянь-Шаня и Таджикской депрессии [Сидорин, 1990]. Район удален от промышленных центров, поэтому уровень техногенных помех был невелик.

На протяжении всего периода наблюдений – с 1955 по 1991 г. – на значительной части территории полигона представительны землетрясения магнитудой около $M \geq 1.0-1.5$; их энергетическая классификация осуществлялась по шкале энергетических классов K [Ризниченко, 1960], корреляционное соотношение между K и M имеет вид: $K = 1.8M + 4$. В настоящей работе используется каталог, рассчитанный по программе НУРО; он содержит информацию о 92.6 тыс. событий, происшедших на полигоне за весь период его существования (1955–1991 гг.).

Для анализа частотного состава вариаций потоков землетрясений использовался периодограммный анализ методом Ломба–Скаргла [Lomb, 1976; Scargle, 1982]. Сравнение фазовых характеристик суточной периодичности осуществлялось несколькими способами: 1) визуально по форме графиков суточного хода сейсмичности, построенных методом наложения эпох; 2) с помощью взаимного корреляционного анализа гистограмм внутрисуточных распределений почасового количества землетрясений; 3) с помощью фазовых диаграмм (годографов) Рэлея–Шустера [Сидорин, 2009]. Оценки статистической значимости оценок фазовых углов результирующих векторов годографов производились по предельным распределениям угловых статистик [Мардиа, 1978].

Полученные результаты

Как уже отмечалось, переход на летнее время в рассматриваемом регионе впервые произошел в 1981 г. и далее осуществлялся ежегодно вплоть до окончания представленного в каталоге периода наблюдений в 1991 г., т.е. в течение 11 лет подряд. Первые несколько лет переход на летнее время происходил 1 апреля каждого года, а возврат к зимнему времени – 1 октября. Затем переходы стали производиться в последние вос-

кресные дни указанных месяцев, за исключением 1991 г., когда возврат к зимнему времени произошел в начале сентября. Менялся и час суток, когда переводились часы.

В соответствии с точно известными моментами перехода на летнее время и обратно для каждого года были сформированы по две выборки сейсмических событий, происшедших в периоды действия зимнего и летнего времени соответственно. Для сопоставления была сформирована выборка землетрясений той же длительности, но за временной интервал, когда летнее время не вводилось; для этого использован предыдущий 11-летний временной интервал – с 1970 по 1980 г. В этой выборке для каждого года аналогичным образом были сформированы выборки землетрясений за зимний и за летний периоды. Временными границами в данном случае были выбраны 1 апреля (виртуальный переход на летнее время) и 1 октября (виртуальный возврат к зимнему времени). Для каждого временного интервала (1970–1980 гг. и 1981–1991 гг.) выборки землетрясений за зимний и за летний периоды были объединены. Выборки землетрясений, относящиеся к периодам действия зимнего времени, помечались буквой W, летнего – S, к ним добавлялись цифры 1 для интервала 1970–1980 гг. и 2 – для интервала 1981–1991 гг. Количество землетрясений в выборках оказалось следующим:

Годы	Зима (W)	Лето (S)	Всего
1970–1980	18 317	16 036	34 353
1981–1991	17 287	13 427	30 714

Как видно, зимой сейсмических событий регистрируется больше, чем летом.

Для применения метода наложенных эпох важно убедиться в наличии в сформированных выборках суточной периодичности. Для этого были вычислены периодограммы Ломба–Скаргла двух сопоставляемых выборок: 1970–1980 и 1981–1991 гг. Полученные результаты представлены на рис. 1. Мощный пик с периодом 24 ч не оставляет никаких сомнений в наличии четкой суточной периодичности землетрясений на протяжении всего представленного на рисунке 22-летнего интервала наблюдений. Сравнивая периодограммы на рис. 1, *а* и 1, *б* между собой, можно отметить несколько большее превышение суточного пика над фоном на временном интервале 1970–1980 гг. В 1981–1991 гг. отчетливы видны пики с периодами 6, 8 и 12 ч, в то время как на рис. 1, *а* их невозможно выделить из фона.

На рис. 2 проведено сопоставление внутрисуточных распределений почасового количества землетрясений зимних и летних периодов на различных временных интервалах. Из-за сильной зашумленности данных они были предварительно сглажены циклически скользящим средним с окном 7 ч. Сопоставляя на рис. 2, *а* моменты минимумов и максимумов графиков, построенных по данным всего каталога, т.е. за 1955–1991 гг., можно сделать вывод об отсутствии каких-либо выраженных фазовых различий изменений потоков землетрясений в летние и зимние периоды, кроме несколько меньшей длительности интервала ночного повышения количества землетрясений в летнее время. Графики суточного хода землетрясений в летние и зимние периоды в 1970–1980 гг., когда не было перехода на летнее время, практически совпадают друг с другом (рис. 2, *б*).

С точки зрения решения задач настоящей работы, наиболее важны данные, представленные на рис. 2, *в* и 2, *г*. На рис. 2, *в* обращает на себя внимание наличие довольно заметного пика в районе минимальных значений количества летних землетрясений. Это соответствует полудню по местному времени, т.е. в период действия летнего времени в 1981–1991 гг. отчетливо выражен полуденный эффект, в то время как в остальное время

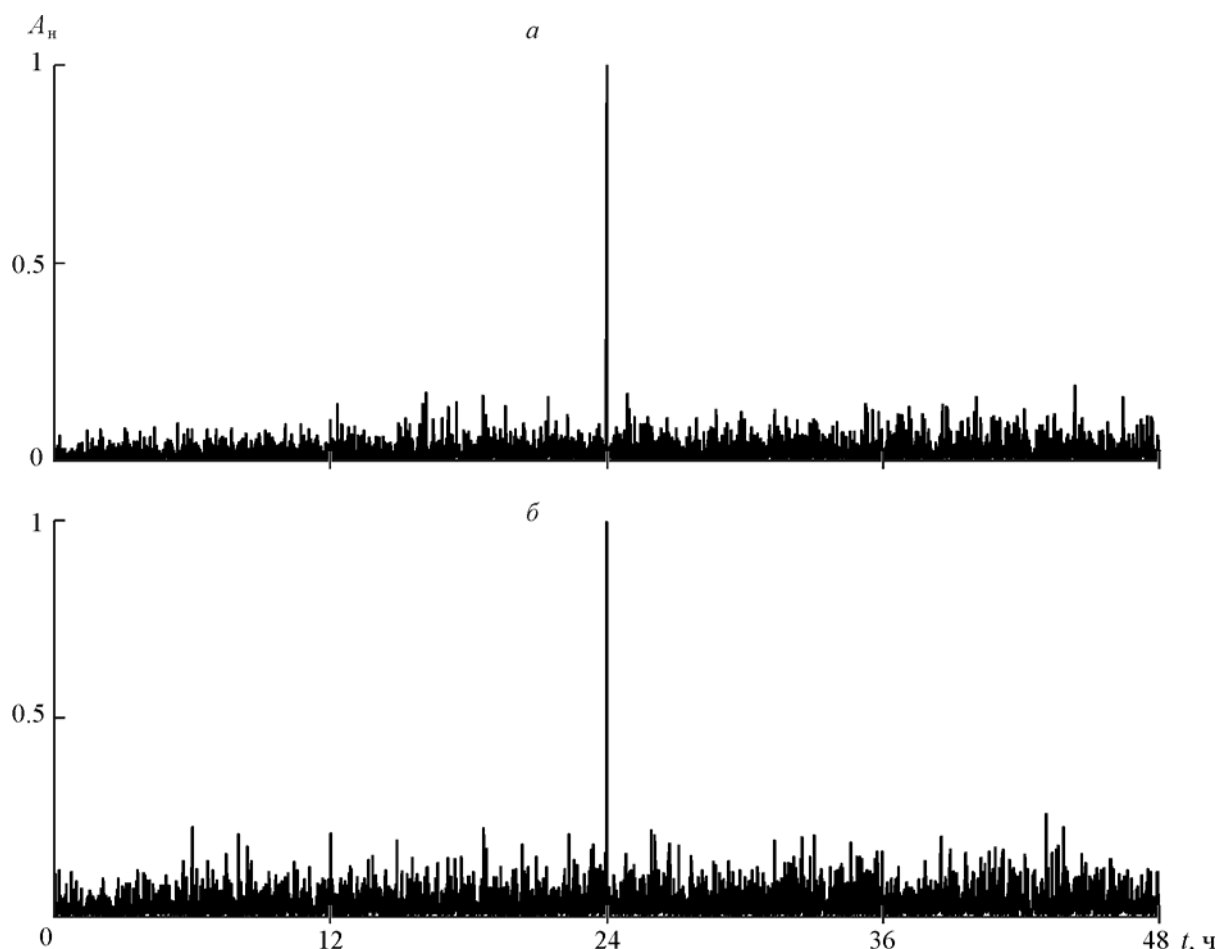


Рис. 1. Периодограммы Ломба–Скаргла для землетрясений, зарегистрированных в Гармском каталоге на временных интервалах 1970–1980 (*а*) и 1981–1991 (*б*) гг.

на сглаженных кривых он значительно меньше. Как и на рис. 2, *а*, на рис. 2, *в* видна меньшая длительность интервала повышенного значения количества землетрясений в летнее время. Это существенно осложняет поиск искомого техногенного эффекта. Практически на его наличие мог бы указывать сдвиг максимального значения землетрясений летом на один час вперед относительно землетрясений, произошедших зимой. Но это проявляется всего лишь по одной-двум точкам.

По данным рис. 2, *г* также можно сделать вывод об отсутствии эффекта опережения на один час суточного хода землетрясений летних периодов 1981–1991 гг. относительно землетрясений летних периодов 1970–1980 гг. Скорее, наоборот, наблюдается обратная тенденция на фронтах повышенных значений суточной кривой, а максимальные значения совпадают во времени. Сопоставление фазовых диаграмм внутрисуточных изменений почасового количества землетрясений зимних периодов 1970–1980 и 1981–1991 гг. (см. рис. 2, *д*) еще раз подчеркивает трудности и неоднозначности выводов подобных сопоставлений. В частности, на рис. 2, *д* видно, что длительность временного интервала ночного повышения количества землетрясений зимних периодов в 1981–1991 гг. больше длительности аналогичного внутрисуточного интервала в 1970–1980 гг. Это произошло за счет запаздывания утреннего фронта внутрисуточных изменений почасового количества землетрясений.

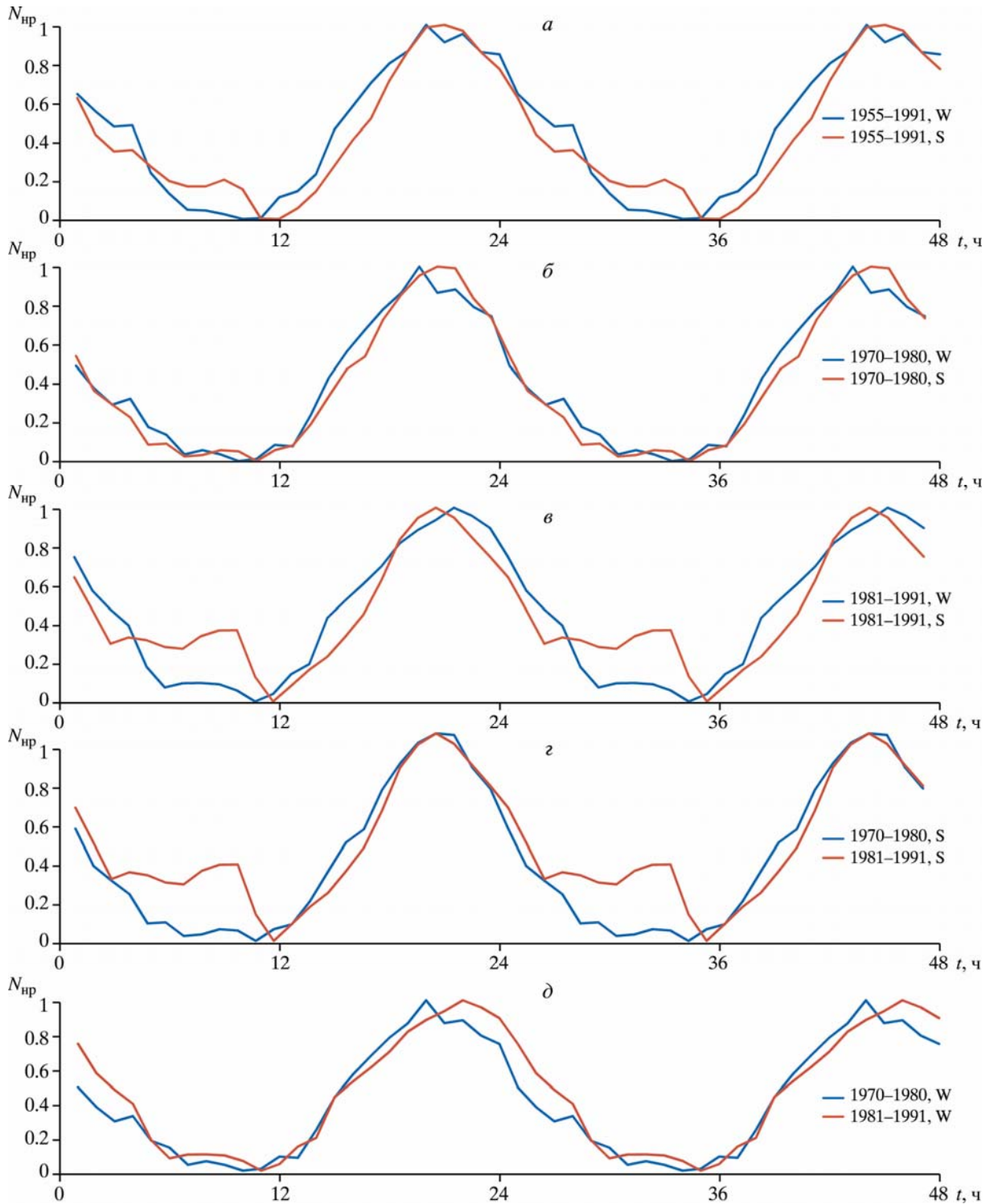


Рис. 2. Внутрисуточные распределения почасового количества зарегистрированных в Гармском каталоге землетрясений зимнего (W) и летнего (S) периодов на разных временных интервалах (время – по Гринвичу)

Резюмируя анализ рис. 2, можно заключить, что хотя и есть некоторые намеки на возможность наличия сдвига на один час вперед фазы суточного хода сейсмических событий в периоды действия летнего времени, что проявилось, например, в таком сдвиге максимальных значений графиков на рис. 2, в, сделать какой-либо определенный вывод не удастся из-за сильной зашумленности данных.

Сопоставление фаз суточного хода зимних и летних землетрясений проводилось также по годографам Рэлея–Шустера [Сидорин, 2009]. В работе [Сидорин, 2011а], в которой анализировались каталоги с большим количеством взрывов, техногенные эффекты проявлялись в появлении изломов на среднем годовом годографе и повороте годографа летних землетрясений на один час вперед по часовой стрелке относительно годографа зимних землетрясений.

На рис. 3 изображены средние годовые годографы Рэлея–Шустера суточной периодичности землетрясений для наблюдений за 1970–1980 и 1981–1991 гг.; на каждом годографе цифрами обозначены точки, которые, по нашему мнению, соответствуют неким нарушениям хода годографа, его изломам. В случае техногенного характера суточной периодичности сейсмических событий изломы должны были наблюдаться в конце марта – начале апреля и конце сентября – начале октября, т.е. на границе кварталов года. При этом годограф состоял бы из трех участков, причем углы годографа на протяжении 1-го и 4-го кварталов, совпадая между собой, были бы больше общего угла годографа в течение 2-го и 3-го кварталов, т.е. средний участок годографа был бы повернут по часовой стрелке на угол 15° (что соответствует 1 ч) относительно двух крайних участков (в начале и конце года).

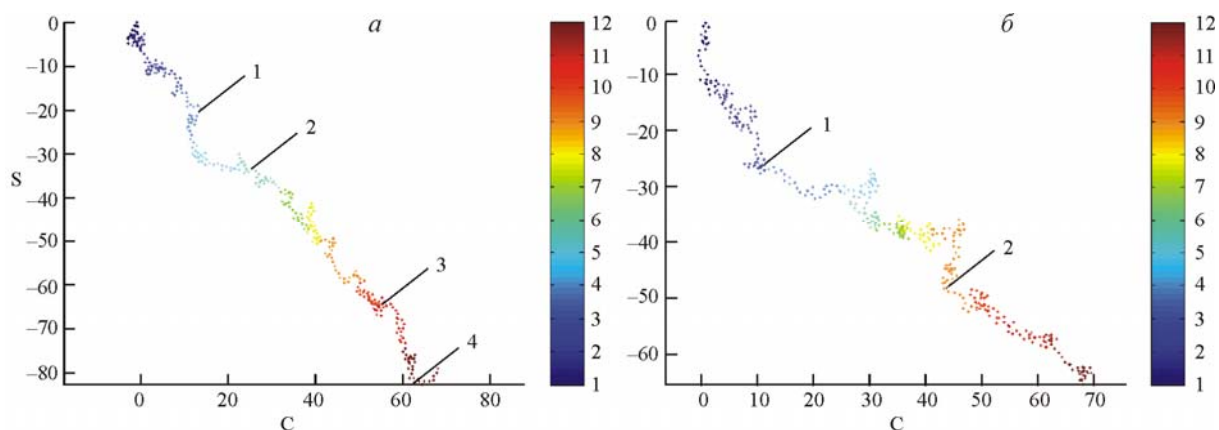


Рис. 3. Средние годовые годографы Рэлея–Шустера суточной периодичности для наблюдений за 1970–1980 (а) и 1981–1991 (б) гг.

Номера обозначенных точек годографа соответствуют следующим календарным дням года: а: 1 – 12 апреля; 2 – 12 июня; 3 – 22 октября; 4 – 23 декабря и б: 1 – 2 апреля; 2 – 18 сентября. Годографы построены для времени по Гринвичу, градация шкалы соответствует 12 месяцам года

На интервале 1970–1980 гг. перехода на летнее время не было, но тем не менее годограф имеет явные изломы – их по крайней мере четыре. Так, примерно в середине апреля годограф резко поворачивается по часовой стрелке, и в течение апреля формируется некая бухтообразная особенность, закончившаяся к середине июня. Дальше почти до конца октября угол годографа остается в среднем практически неизменным, но осложненным случайными отклонениями. Угол годографа на участке между точками 2 и 3 визуально почти совпадает с аналогичным углом на участке до точки 1 (1-й квартал года); возможно, средний участок годографа немного повернут против часовой стрелки относительно годографа 1-го квартала. В районе точки 3, т.е. примерно в середине октября, годограф довольно резко поворачивается против часовой стрелки. И, наконец, в районе зимнего солнцестояния отмечена новая особенность; подобные особенности годографов в день зимнего солнцестояния наблюдаются в каталогах землетрясений многих других регионов мира.

На годографе, построенном по данным за 1981–1991 гг., когда вводилось летнее время, достаточно определенно можно выделить три участка с разными углами наклона годографа; его точки излома приурочены к самому началу апреля и середине сентября, что неплохо согласуется с нашими ожиданиями для случая наличия в каталоге техногенных эффектов. Однако поворот годографа в начале апреля происходит вопреки ожиданиям против часовой стрелки. Также вопреки ожиданиям для случая техногенных событий осенью годограф поворачивается по часовой стрелке. Кроме того, не согласуется с нашими представлениями легко заметное визуальное различие фаз суточной периодичности на начальном (до точки 1) и конечном (после точки 2) участках годографа. Отметим еще весьма значительные возмущения годографа на его среднем участке (между точками 1 и 2).

В целом приходим к выводу, что визуальный анализ рис. 3, как и ранее такой же анализ рис. 2, не выявил каких-либо явных фазовых изменений суточного хода почасового количества землетрясений, свидетельствующих о техногенной природе суточной периодичности землетрясений. Поэтому попытаемся сделать некоторые численные оценки в надежде, что статистические оценки помогут выявить в анализируемых данных скрытые техногенные эффекты; конечно, если они есть. Полученные оценки сведены в табл. 1, в которой представлены данные отдельно для летних и зимних землетрясений периодов наблюдений 1970–1980 и 1981–1991 гг., которые обозначены в столбцах 1 и 2.

Таблица 1. Оценки фазовых углов (в градусах) годографов Рэлея–Шустера для разных временных интервалов наблюдений

Годы	Сезоны	По всему интервалу			По совокупности оценок для отдельных годов		
		По событиям	По среднесуточным данным	Стандартное отклонение	Медиана	Среднее значение	Стандартное отклонение
1	2	3	4	5	6	7	8
1970–1980	Зима (W1)	–56.4	–57.6	12.2	–58	–56.5	5.0
	Лето (S1)	–53.6	–53.0	7.8	–56.5	–49.9	7.1
1981–1991	Зима (W2)	–44.5	–35.8	8.0	–39.9	–45.5	6.7
	Лето (S2)	–37	–30.5	11.2	–10.3	–10.6	13.1

В столбце 3 приведены оценки фазового угла результирующего вектора, построенного по всем сейсмическим событиям за 6 различных временных интервалов, указанных в столбцах 1 и 2. При получении оценок, приведенных в столбце 4, использовались среднесуточные единичные векторы землетрясений, а в столбце 5 – соответствующее значение стандартного отклонения, которое оценивалась, как отмечалось выше, по предельным распределениям угловых статистик [Мардуа, 1978].

Для получения оценок, приведенных в столбцах 6–8, сначала были определены фазовые углы для зимнего и летнего интервалов каждого года наблюдений. В итоге для каждого интервала (для каждой строки таблицы) были получены 11 значений, по которым рассчитывались медианы, средние значения и их стандартные отклонения.

Видно, что различия оценок, сделанных разными методами, находятся в основном в пределах нескольких градусов. Исключение составляют лишь оценки для землетрясений в период действия летнего времени (интервал S2 за 1981–1991 гг.), для него размах значений достигает почти 27° . По-видимому, это вызвано отмеченным выше появлением в этот период значительного по амплитуде полуденного эффекта. Отметим также хорошее совпадение оценок стандартного отклонения, сделанных по годографам, построенным для каждого рассматриваемого интервала в целом, с оценками, полученными в результате осреднения данных по годографам, построенным по данным отдельных лет.

С точки зрения задач настоящей работы, наибольший интерес представляет разность фаз между летними и зимними землетрясениями. Для ее оценки значение угла результирующего вектора зимних землетрясений вычиталось из соответствующего значения летних землетрясений. Полученные значения приведены в табл. 2. В случае исключительно техногенного характера суточной периодичности исследуемых землетрясений эта разность должна была быть отрицательной и составлять 15° , что соответствует переводу времени на 1 ч. Однако, как видим, все полученные значения без каких-либо исключений положительны. В 1970–1980 гг. фазы летних и зимних землетрясений практически совпадают; положительная разность, отражающая запаздывание летних землетрясений, находится, по разным оценкам, в пределах 2.8° – 7.1° , что составляет менее получаса.

Таблица 2. Разности фазовых углов (в градусах) годографов Рэля–Шустера для разных временных интервалов наблюдений

Годы	Сезоны	По всему интервалу		По совокупности оценок для отдельных годов	
		По событиям	По среднесуточным данным	Медиана	Среднее значение
1970–1980	S1–W1	2.8	3.4	7.1	6.6
1981–1991	S2–W2	7.5	5.3	26.9	34.9
1970–1991	S2–S1	16.6	22.5	46.2	39.3
1970–1991	W2–W1	11.9	21.8	18.1	11

В 1980–1991 гг. оценки разности фаз, полученные по всему интервалу, практически не изменились, – оставаясь положительными, они не превышают 7.5° . Однако оценки по совокупности отдельных годов очень сильно выросли – более чем до 40° . Видимо, это следствие малой статистики и выбросов в отдельные годы.

Таким образом, ни одним из использованных методов сопоставления фазы суточной периодичности землетрясений в разные периоды наблюдений не удалось обнаружить ожидаемого поворота годографа на один час (15°) против часовой стрелки при переходе на летнее время. Скорее, наоборот, можно говорить о повороте годографа по часовой стрелке.

Далее рассмотрим взаимно корреляционные функции внутрисуточных распределений почасового количества землетрясений для различных сопоставляемых в настоящей работе временных интервалов, используя для этого подход, аналогичный использованному в работе [Сидорин, 2013б]. Сопоставлялись пары землетрясений летнего (S) и зимнего (W) периодов для интервалов 1970–1980 (рис. 4, а) и 1981–1991 (рис. 4, б) годов, а также пара землетрясений летнего периода интервалов 1970–1980 и 1981–

1991 гг. (рис. 4, в). На рис. 4, а и 4, б положительные значения времени сдвига соответствуют сдвигу назад землетрясений зимнего периода относительно землетрясений летнего периода, а на рис. 4, в летних землетрясений 1970–1980 гг. относительно летних землетрясений 1981–1991 гг. Это означает, что при техногенном механизме возникновения суточной периодичности землетрясений следует ожидать максимальной корреляции на рис. 4, б и 4, в при значениях сдвига по времени $t = -1$ ч. На рис. 4, а можно предполагать наличие максимума при нулевом сдвиге.

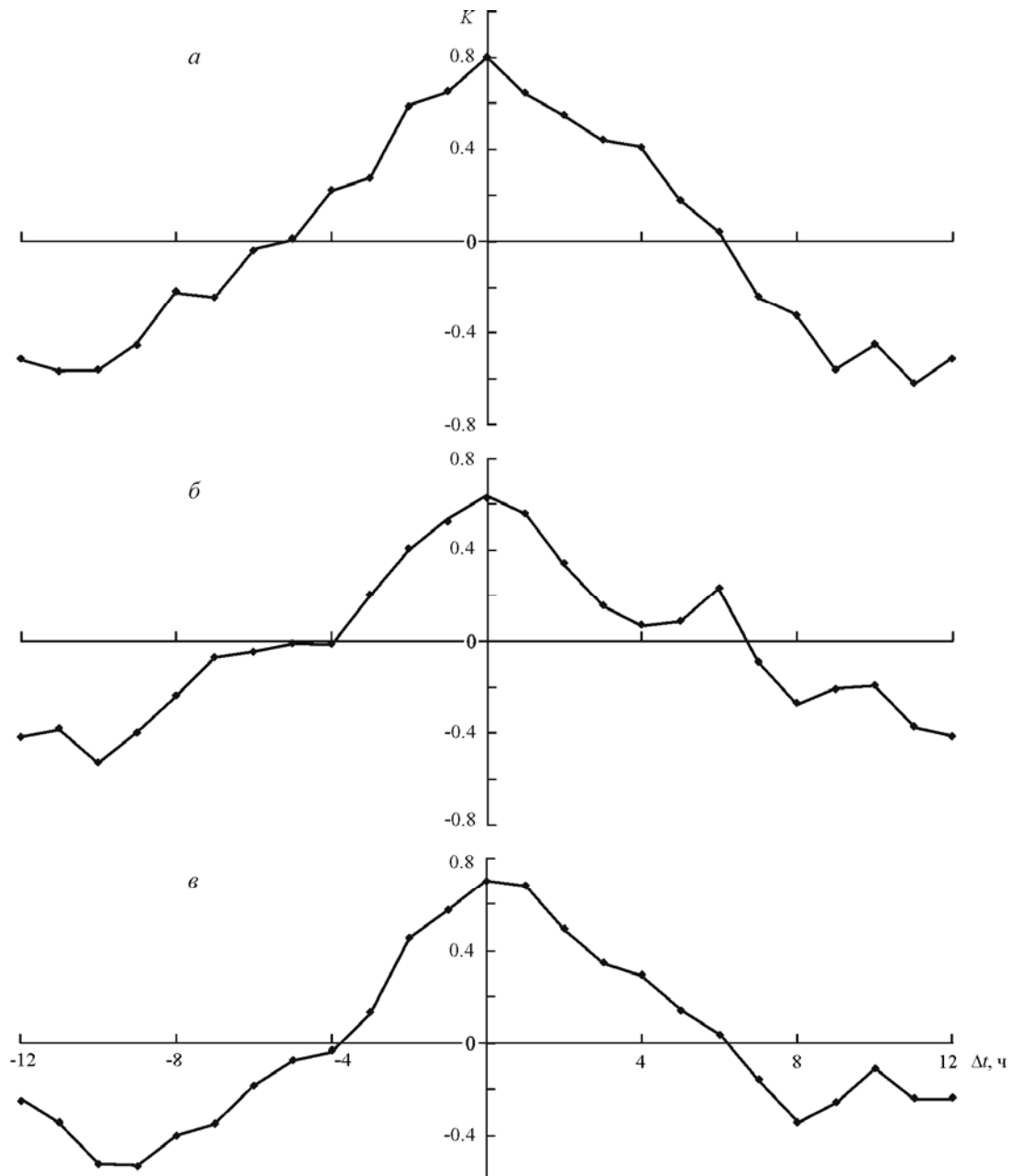


Рис. 4. Взаимно корреляционные функции пар внутрисуточных распределений почасового количества землетрясений для различных временных интервалов
 а – 1970–1980 гг., S1–W1; б – 1981–1991 гг., S2–W2; в – S2–S1

В реальности на рис. 4, а, б действительно наблюдается максимум при нулевом сдвиге графиков суточного хода. Этот результат можно рассматривать как еще один аргумент в поддержку тезиса об отсутствии техногенной составляющей или по крайней мере столь малой ее амплитуде, что она не может быть обнаружена на фоне обычных статистических флуктуаций.

Обсуждение и заключение

В настоящей работе для поиска техногенных эффектов в каталоге землетрясений Гармского полигона выполнено сравнение фазовых характеристик суточной периодичности землетрясений в периоды действия летнего и зимнего времени. Предполагалось, что при наличии сильных техногенных эффектов фаза суточной периодичности должна скачком сдвигаться на час вперед при переходе на летнее время.

Несмотря на то, что суточная периодичность в исследованном каталоге землетрясений выражена очень отчетливо, ни одним из использованных методов не удалось обнаружить искомого эффекта сдвига ее фазы при переходах на летнее время и обратно. Это можно объяснить большой погрешностью полученных оценок и обусловленностью суточной периодичности землетрясений на Гармском полигоне природными процессами.

Большая погрешность может объясняться низким уровнем техногенных помех на полигоне. Если принять, что суточная периодичность является кажущейся и обусловлена шумовой дискриминацией сейсмических сигналов [Сидорин, 2013а], можно предположить, что основной природный источник помех с суточной периодичностью – это шумы от потоков горных рек, на берегу которых располагались сейсмические станции полигона.

Литература

- Адушкин В.В. Сейсмичность взрывных работ на территории Европейской части России // Физика Земли. 2013. № 2. С. 110–130. doi: 10.7868/S000233371301002X
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Афтершоки подземных взрывов: Препринт. ИГД АН СССР, 1991. 34 с.
- Адушкин В.В., Родионов В.Н., Турунтаев С.Б., Юдин А.Е. Сейсмичность месторождений углеводородов // Нефтегазовое обозрение – Шлюмберже. 2000. Т. 5, № 1. С. 4–15.
- Акрамходжаев А.М., Ситдииков Б.Б., Бегметов Э.Ю. О возбужденном характере Газлийских землетрясений в Узбекистане // Узбек. геол. журн. 1984. № 4. С. 17–19.
- Годзиковская А.А. Задача распознавания карьерных взрывов и местных землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. 1987. Вып. 28. С. 232–236.
- Годзиковская А.А. Местные взрывы и землетрясения. М.: Гидропроект, 1995. 100 с.
- Годзиковская А.А. Дальность макросейсмических проявлений взрывов // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39, № 3. С. 52–58.
- Годзиковская А.А., Прибылова Н.Е. Сейсмические события Европейской части бывш. СССР, Урала и Западной Сибири // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41, № 2. С. 5–22.
- Гупта Х., Растоги Б. Плотины и землетрясения. М.: Мир, 1979. 256 с.
- Децеровская Е.В., Сидорин А.Я. Ложная годовая периодичность землетрясений, обусловленная сезонными изменениями помех // Докл. РАН. 2005. Т. 400, № 6. С. 798–802.
- Еременко А.А., Еременко В.А., Скляр Н.И., Матвеев И.Ф., Шипеев О.В. Влияние промышленных взрывов на распределение сейсмических и динамических явлений в массиве горных пород // Горн. журн. 2002. № 1. С. 40–43

- Еременко В.А., Еременко А.А., Рашева С.В., Турунтаев С.Б. Влияние взрывов на техногенную сейсмичность в районе Таштагольского месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 5. С. 66–74.
- Журавлев В.И., Лукк А.А. Полуденная активизация сейсмичности в Турции и ряде других регионов мира // Геофизические исследования. 2011. Т. 12, № 4. С. 31–57.
- Зотов Г.А., Черных В.А. Геодинамические процессы при разработке месторождений углеводородов // Геотехнологические проблемы разработки месторождений природного газа. М.: ВНИИГАЗ, 1992. С. 24–30.
- Калинин В. Свита для нефтяных королей // Сибирская нефть. 2012. № 4/91. С. 16–19.
- Капустян Н.К., Сидорин А.Я., Фихиева Л.М. Воздействие Нурекского водохранилища на геофизическую среду. М.: ОИФЗ РАН, 1998. 24 с.
- Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений / Пер. с англ. Под ред. Л.Н. Большева. М.: Наука, 1978. 240 с.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Влияние механических вибраций на сейсмичность // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313, № 1. С. 78–83.
- Науменко Б.Н. О явлении частичной ликвидации тектонических напряжений штормовыми микросейсмами // Изв. АН СССР. 1979. № 8. С. 72–75.
- Орлов С. Меняя правила // Сибирская нефть. 2012. № 4/91. С. 10–14.
- Островский А.А. Возможная причина сезонной периодичности некоторых калифорнийских землетрясений // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313, № 1. С. 83–86.
- Ризниченко Ю.В. (ред.). Методы детального изучения сейсмичности. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 328 с. (Тр. Ин-та физики Земли. № 9 (176)).
- Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. № 6. С. 32–42.
- Сидорин А.Я. (ред.). Гармский геофизический полигон. М.: ИФЗ АН СССР, 1990. 240 с.
- Сидорин А.Я. Годовая и суточная периодичности землетрясений Нурекского района // Геофизические исследования. 2005а. № 4. С. 99–114.
- Сидорин А.Я. Полуденный эффект во временных рядах землетрясений и сейсмического шума // Докл. РАН. 2005б. Т. 402, № 6. С. 822–827.
- Сидорин А.Я. Суточная периодичность землетрясений Средней Азии. Ч. 5. Каталог Киргизской цифровой широкополосной сейсмической сети KNET Греции // Сейсмические приборы. 2007. Вып. 43. С. 61–78.
- Сидорин А.Я. О применении метода Рэлея–Шустера в исследованиях периодичности землетрясений // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45, № 3. С. 29–40.
- Сидорин А.Я. Причина необычной суточной периодичности сейсмических событий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011а. Т. 38, № 2. С. 55–70.
- Сидорин А.Я. Связь параметров фазовых диаграмм суточной периодичности и графика повторяемости землетрясений Гармского района // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011б. Т. 38, № 4. С. 59–82.
- Сидорин А.Я. Различия внутрисуточных фазовых диаграмм потоков землетрясений разной энергии // Сейсмические приборы. 2013а. Т. 49, № 2. С. 71–84.
- Сидорин А.Я. Особенности суточной периодичности землетрясений Японии // Сейсмические приборы. 2013б. Т. 49, № 3. С. 55–84.
- Сидорин А.Я. Техногенные эффекты в сейсмичности района Курпсайского и Токтогульского водохранилищ // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41, № 3. С. 75–86.
- Смирнова М.Н. Возбужденные землетрясения в связи с разработкой нефтяных месторождений (на примере Старогрозненского землетрясения) // Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М.: Наука, 1977. С. 128–141.

- Bardainne T., Dubos-Sallée N., Sénéchal G., Gaillot P., Perroud H.* Analysis of the induced seismicity of the Lacq gas field (Southwestern France) and model of deformation // *Geophys. J. Int.* 2008. V. 172, N 3. P. 1151–1162.
- Brodsky E.E., Lajoie L.J.* Anthropogenic seismicity rates and operational parameters at the Salton Sea geothermal field // *Science*. 2013. V. 341, N 6145. P. 543–546.
- Carlidge E.* Human activity may have triggered fatal Italian earthquakes, Panel Says // *Science*. 2014. V. 344, N 6180. P. 141. doi: 10.1126/science.344.6180.141
- Cesca S., Grigoli F., Heimann S., Gonz'alez A., Buforn E., Maghsoudi S., Blanch E., Dahm T.* The 2013 September–October seismic sequence offshore Spain: A case of seismicity triggered by gas injection? // *Geophys. J. Int.* 2014. V. 198. P. 941–953.
- Davies R., Foulgera G., Bindleya A., Styles P.* Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons // *Marine and Petroleum Geology*. 2013. V. 45. P. 171–185. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2013.03.016
- Deichmann N., Giardini D.* Earthquakes induced by the stimulation of an enhanced geothermal system below Basel (Switzerland) // *Seismol. Res. Lett.* 2009. V. 80, N 5. P. 784–798.
- Dura-Gomez I., Talwani P.* Reservoir induced seismicity associated with the Itoiz Reservoir, Spain: A case study // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 181. P. 343–356.
- Ellsworth W.L.* Injection-induced earthquakes // *Science*. 2013. V. 341, N 6142. P. 142–143. doi: 10.1126/science.1225942
- Evans D.M.* The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal disposal well // *Mountain Geologist*. 1966. V. 3. P. 23–36.
- Grasso J.-R., Wittlinger G.* Ten years of seismic monitoring over a gas field // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1990. V. 80. P. 450–473.
- Gulia J.* Detection of quarry and mine blast contamination in European regional catalogues // *Natural Hazards*. 2009. V. 53, N 2. P. 229–249.
- Gupta H.K.* Reservoir-induced seismicity. Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. B. V., 1992. 364 p. (Developments in Geotechnical Engineering, 64).
- Hand E.* Injection wells blamed in Oklahoma earthquakes // *Science*. 2014. V. 345, N 6192. P. 13–14. doi: 10.1126/science.345.6192.13
- Healy J., Rubey W., Griggs D., Raleigh C.* The Denver earthquake // *Science*. 1968. V. 161. P. 1301–1310.
- Horasan G., Boztepe-Guney A., Kusmezer A., Bekler F., Ogutcu Z., Musaoglu N.* Contamination of seismicity catalogs by quarry blasts: An example from İstanbul and its vicinity, Northwestern Turkey // *J. Asian Earth Sci.* 2009. V. 34, N 1. P. 90–99.
- Hsieh P.A., Bredehoeft J.D.* A reservoir analysis of the Denver earthquakes: A case of induced seismicity // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86, N 2. P. 903–920.
- Keranen K.M., Weingarten M., Abers G.A., Bekins B.A., Ge S.* Sharp increase in Central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection // *Science*. 2014. V. 345, N 6195. P. 448–451. doi: 10.1126/science.1255802
- Kerr R.A., Stone R.* A human trigger for the great quake of Sichuan? // *Science*. 2009. V. 323, N 5912. P. 322. doi: 10.1126/science.323.5912.322
- Kiszely M.M.* Discriminating of small earthquakes from quarry-blasts in the Vértes Hills, Hungary using complex analysis // *Acta Geodetica et Geophysica Hungarica*. 2009. V. 44, N. 2. P. 227–244.
- Kiszely M.M.* Statistical analysis of earthquakes and quarry blasts in the Carpathian Basin – new problems and facilities // *Carpathian J. of Earth and Environmental Sci.* 2010. V. 5, N 2. P. 101–110.
- Liu S., Xu L., Talwani P.* Reservoir induced seismicity in the Dajangkou Reservoir: A quantitative analysis // *Geophys. J. Int.* 2011. V. 185. P. 514–526.
- Lomb N.R.* Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // *Astrophys. Space Sci.* 1976. V. 39. P. 447–462.

- Mekkawi M., Grasso J.R., Schnegg P.A.* A long-lasting relaxation of seismicity at Aswan reservoir, Egypt, 1982–2001 // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2004. V. 94. P. 479–492.
- Mulgaria F., Bizzarri A.* Anthropogenic triggering of large earthquakes // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. Article N 6100. doi: 10.1038/srep06100
- Record number of Oklahoma tremors raises possibility of damaging earthquakes / Updated USGS – Oklahoma Geological Survey Joint Statement on Oklahoma Earthquakes. Originally Released: 10/22/2013 1:07:59 PM; Updated May 2, 2014.
- Rubinstein J.L., Ellsworth W.L., McGarra A., Benz H.M.* The 2001–present induced earthquake sequence in the raton basin of Northern New Mexico and Southern Colorado // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2014. V. 104, N 5. P. 2162–2181. doi: 10.1785/0120140009.
- Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. 835–853.
- van der Elst N.J., Savage H.M., Keranen K.M., Abers G.A.* Enhanced remote earthquake triggering at fluid-injection sites in the Midwestern United States // *Science*. 2013. V. 141, N 6142. P. 164–167. doi: 10.1126/science.1238948.
- Westaway R., Younger P.L.* Quantification of potential macroseismic effects of the induced seismicity that might result from hydraulic fracturing for shale gas exploitation in the UK // *Quart. J. of Eng. Geol. and Hydrogeol.* 2014. V. 47. P. 333–350.

Сведения об авторе

СИДОРИН Александр Яковлевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-42-68. E-mail: sidorin@ifz.ru

SEARCH FOR TECHNOGENIC EFFECTS IN THE GARM RESEARCH AREA EARTHQUAKE CATALOG

A.Ya. Sidorin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. A search for technogenic effects is performed in the earthquake catalog for the high mountain Garm region in Tajikistan. During the observation period population density and technogenic noise were low. We used phase diagnostic methods based on comparison between the data on the diurnal earthquake periodicity related to time intervals with different phases of the technosphere activity. The data related to the periods of the daylight saving time (summer earthquakes) were compared to the data related to the winter time (winter earthquakes). We supposed that after a hour change in the local time, the phase of the diurnal earthquake periodicity should change in the same direction. The analysis was performed with the methods of Lomb–Scargle’s periodograms, epoch superposition, mutual correlation, and modified Rayleigh–Schuster phase hodographs. Despite the large amplitude of the diurnal earthquake periodicity, we have not revealed the searched phase shift between summer and winter earthquakes. The result can be explained by the large errors in the phase estimations, low technogenic noise, and strong natural noise from the mountain rivers running near the seismic stations.

Keywords: seismicity, Garm region, technogenic effects, diurnal periodicity, phase diagnostic, daylight saving time.