

УДК 550.34: 551.5

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ**Ярошевич М.И., Ингель Л.Х., Лысенко Д.А.***НПО «Тайфун», Обнинск, e-mail: yarosh@rpatyphoon.ru*

Давно известно, что атмосферные процессы, вообще говоря, приводят к генерации сейсмических сигналов. Однако в течение длительного времени сейсмологи рассматривали их только в качестве шума. В последние годы, появились дополнительные причины для исследования таких сигналов. Представляют интерес два различных аспекта: 1) Использование сигналов с малой амплитудой. Сейсмические сигналы, как источник информации (оперативная регистрация опасных явлений, мониторинг, системы предупреждения, прогнозирования для очень коротких периодов времени). 2) Сильные эффекты – возможное влияние атмосферных процессов на сейсмическую активность. Таким образом, необходимо исследовать сейсмические проявления атмосферных процессов как в качестве полезных сигналов так и в качестве помех. В обзоре представлены некоторые из относящихся сюда результатов авторов за последние годы.

Ключевые слова: сейсмика, интенсивные атмосферные процессы, грозы, конвективные облака, торнадо, тропические циклоны

SEISMIC MANIFESTATIONS OF THE ATMOSPHERIC PROCESSES**Yaroshevich M.I., Ingel L.K., Lysenko D.A.***Research and Production Association «Typhoon», Obninsk, e-mail: yarosh@rpatyphoon.ru*

It is known long ago that atmospheric processes lead to generation of the seismic signals. But for a long time seismologists considered that only as a noise. In the recent years, the additional motivations appeared for study of such signals. There are two different aspects: 1) Using of signals with a low amplitude. Seismic signals as a source of information (prompt recording of hazardous phenomena, monitoring, warning system, forecasting for very short periods). 2) Dramatic effects – possible influence of atmospheric processes on a seismic activity. So, seismic manifestations of atmospheric processes are needed to investigate – both as such useful signals and as a noise. The article presents some of the relevant results of the authors of recent years.

Keywords: seismic, intensive atmospheric processes, thunderstorms, convective clouds, tornadoes, tropical cyclones

На первый взгляд, может показаться, что атмосферные процессы, как правило, слишком слабы, эфемерны, для того, чтобы заметно воздействовать на твердую земную кору. Но чувствительность современных сейсмических приборов позволяет достаточно уверенно регистрировать многие типы таких воздействий. Вероятно, первым, кто обратил внимание на сейсмические сигналы «атмосферного» происхождения, был российский академик Б.Б. Голицын, один из основоположников сейсмологии.

В течение долгого времени сейсмологи рассматривали сигналы гидрометеорологического происхождения как досадные помехи в их основной работе. Сейсмические приборы до сих пор, как правило, сознательно конструируются таким образом, чтобы такие сигналы «не замечать». Если они и изучались, то, обычно, лишь затем, чтобы лучше их отфильтровывать [1].

Но в последнее время становится все более понятным, что взаимодействием геосфер не следует пренебрегать. В частности, сейсмические сигналы в каких то случаях могут нести полезную информацию о гидрометеорологических процессах. Еще более интересно то, что воздействие таких процессов на земную кору бывает не таким

уж незначительным. Накапливается все больше свидетельств того, что земная кора бывает уязвимой по отношению к таким воздействиям, которые, таким образом, вообще говоря, могут влиять и на сейсмический режим – на частоту и силу землетрясений.



Б.Б. Голицын (1862-1916)

Относящимся сюда вопросам посвящена уже довольно обширная литература.

Не претендуя здесь на всестороннее ее освещение, мы предполагаем рассказать лишь о некоторых современных исследованиях и результатах. На базе институтов г. Обнинска имеются уникальные возможности одновременного анализа и сопоставления данных метеорологических наблюдений и сейсмических сигналов, связанных с атмосферными явлениями. Здесь располагается Геофизическая Служба РАН с сейсмической станцией и обширным архивом сейсмических данных, непрерывно пополняемым данными мировой сети. Следует упомянуть также Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ), входящий в «НПО «Тайфун», располагающий Высотной (300 м) метеорологической мачтой (ВММ) и ВНИИГМИ (Институт гидрометеорологической информации Росгидромета) с соответствующим архивом. Использование этих возможностей позволило в последние годы получить ряд относящихся к данной проблеме полезных результатов. В соответствии с вышесказанным, можно говорить о двух существенно разных направлениях исследований: 1) регистрация и анализ слабых сейсмических сигналов, как источника информации об атмосферных процессах; 2) исследование влияния интенсивных атмосферных явлений на сейсмическую активность.

Облака как источники сейсмических сигналов

Наибольший интерес могли бы представлять перспективы оперативной регистрации сейсмических сигналов от достаточно интенсивных, опасных, атмосферных явлений, таких как смерчи или шквалы (см. ниже). Одна из наиболее трудных проблем на этом пути – выявление полезных сигналов на фоне помех. Если тот же смерч проходит, скажем, в 10 км от сейсмостанции, то гораздо ближе к ней, может происходить, например, гроза или просто «проплывать» интенсивные облака. А есть ещё внутренние гравитационные волны, распространяющиеся в атмосфере на большие расстояния от тех же гроз и других интенсивных конвективных явлений [2]. Будут ли заметны сейсмические сигналы от удаленного смерча на фоне «шума» от более слабых, но зато более близких источников? В этой ситуации требуется изучать не только полезные сигналы, но и возможные источники помех.

Сейсмическая станция «Обнинск» находится на окраине города примерно в двух километрах от института, в котором работают авторы. Регистрируемые ею сейсмические сигналы можно отслеживать в Интернете в режиме реального времени. Авторы

давно заметили, что когда за окном темнеет (над городом «проплывает» густая туча), это обычно сразу отражается на сейсмограммах. Для интенсивных конвективных облаков характерны горизонтальные размеры порядка 3-5 км (разброс их масштабов вообще-то очень велик). Характерная скорость ветра – порядка 10 м/с. Таким образом, время прохождения облака над сейсмостанцией получается порядка 5-10 минут. Соответствующая изменчивость сигналов при прохождении конвективных облаков часто видна на сейсмограммах даже без специальной обработки – «невооруженным глазом».

Некоторое время назад авторы выполнили более подробное исследование [3]. Известно, что под интенсивными облаками атмосферное давление несколько отличается от «фона». Причина, прежде всего, в том, что облачная среда с отклонениями ее температуры, влажности, наличием капель и др. приводит к некоторым вариациям веса столба воздуха. А связанные с этим вариации давления, вообще говоря, приводят к горизонтально-неоднородным деформациям поверхности грунта. Естественно предположить, что это и является простейшей причиной низкочастотных сейсмических сигналов, регистрируемых при прохождении интенсивных облаков.

Пусть, например, температура столба воздуха высотой h превышает температуру окружающей среды на величину ΔT . Тогда вес такого столба меньше, чем в окружающей среде на величину порядка

$$\Delta p \approx gh\Delta\rho \approx \rho_0 g h \alpha \Delta T, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, α – термический коэффициент расширения воздуха ($\alpha = 1/T_0$), $\Delta\rho$ – амплитуда отклонения плотности в рассматриваемом столбе (использовано так называемое приближение Буссинеска [4], согласно которому $\Delta\rho \approx \rho_0 \alpha \Delta T$), ρ_0 и T_0 – отсчетные значения плотности и абсолютной температуры соответственно. Если $\Delta T = 1$ К, $h = 3$ км, то получаем значение Δp около 1 миллибара (100 Пс). В конвективных облаках амплитуды ΔT бывают и значительно большими; соответственно и амплитуды возмущений приземного давления, по литературным данным, могут достигать нескольких миллибар [5]. Наши расчеты с использованием теории упругости показали, что порядки амплитуд вертикальных деформаций грунта u можно грубо оценивать по формуле, внешне напоминающей закон Гука:

$$u \sim L\Delta p / E, \quad (2)$$

где L – горизонтальный масштаб области, в которой отклонено давление, E – модуль Юнга (почвы). Оценки показывают, что в случае интенсивных облаков амплитуда u может достигать и превышать несколько микрон, а это более чем достаточно для сейсмической регистрации. Имеются, конечно, и более «медленные» источники колебаний давления и деформаций грунта, например, атмосферные фронты и циклоны.

На сейсмостанциях используются датчики, регистрирующие смещения почвы в трех измерениях («вертикальный» и два «горизонтальных» сейсмографа). Интересно отметить, что низкочастотные сейсмические сигналы, о которых идет речь, более эффективно регистрируются не вертикальными, а горизонтальными сейсмографами [3]. Последние, в силу особенностей своей конструкции, на низких частотах действуют как относительно чувствительные наклонометры, регистрирующие, в частности, наклоны поверхности грунта, связанные с упомянутыми вариациями давления при перемещении облаков. Поэтому, если на высоких частотах (которые, в основном, интересуют сейсмологов) эти приборы призваны регистрировать горизонтальные смещения грунта, то на низких частотах они достаточно эффективно регистрируют вертикальные деформации.

В сейсмологической литературе нередко упоминается о сигналах «ветрового» происхождения [1]. Мы полагаем, что во многих таких случаях истинная причина сигналов – не ветер, а вариации давления. Дело в том, что горизонтальные градиенты давления, возникающие, например, под интенсивными облаками, приводят к возникновению воздушных течений (ветра). Когда ощущается этот ветер и одновременно регистрируются сейсмические сигналы, легко начинает казаться, что ветер и является причиной этих сигналов. В действительности, нередко деформации почвы и ветер коррелируют потому, что вызваны одними и теми же отклонениями давления. В то же время, достаточно сильный ветер, может, вообще говоря, генерировать и дополнительные сейсмические сигналы, не связанные непосредственно с отклонениями давления. Это может быть связано, например, с турбулентностью воздушных течений, воздействием ветра на сооружения и растительность. Разрушения, вызываемые сильными ветрами (например, падение деревьев), также могут приводить к заметной генерации сейсмических сигналов, но сигналы различной природы, вообще говоря, сильно различаются не только по амплитуде, но и по частоте.

Грозы

В случае грозы к колебаниям давления и порывам ветра добавляются и некоторые другие, прежде всего, акустические эффекты. Остановимся на относительно недавнем эпизоде, подробно исследованном нами [6].

Вечером 28 декабря 2012 г. в г. Обнинске наблюдалось редкое явление – зимняя гроза. Во время сильного снегопада после 19 ч 30 м по местному времени, с интервалом примерно 2-3 минуты, дважды сверкнули молнии, сопровождавшиеся раскатами грома. В данном случае, поскольку молниевых разрядов зарегистрировано всего два (причем второй – относительно слабый) и имеется зафиксированная в ИЭМ магнитограмма, позволяющая указать время разрядов с точностью до секунды, существует редкая возможность точной «привязки» по времени и сопоставления метеорологических и сейсмических наблюдений. К тому же, в отличие от летних гроз, сопровождаемых сильными порывами ветра, в данном эпизоде ветер был относительно слабый, около 5 м/с. Это дает особые возможности изучения акустосейсмических эффектов при отсутствии сильных помех.

На Обнинской сейсмостанции регистрируются три проекции сейсмических сигналов (в вертикальном и в двух горизонтальных направлениях – север-юг и восток-запад) с частотой 20 опросов в секунду. Спектр регистрируемых сигналов, вообще говоря, очень широкий. Чтобы выявить и проанализировать сигналы различной природы, имеет смысл отдельно изучать различные участки этого спектра.

На рис. 1 приведены три проекции сейсмического сигнала (на всех сейсмограммах по оси ординат представлена амплитуда в относительных единицах) в области спектра 5-7 Гц за несколько десятков секунд до и после разряда молнии (верхняя сейсмограмма – вертикальная компонента, вторая – компонента восток-запад, третья – север-юг). Видны достаточно четко выраженные сигналы, несомненно, связанные с этим событием. Их продолжительность порядка 10 секунд.

Другого типа сигналы хорошо видны, если выделить низкочастотную часть спектра (рис. 2). Относительно сильные низкочастотные сигналы продолжительностью порядка 10 минут зарегистрированы преимущественно горизонтальными сейсмографами. Но заметный сигнал наблюдается в течение нескольких десятков минут, причем не только после разряда молнии, но и до него.

В этот же период на Высотной метеорологической мачте ИЭМ зарегистрированы существенные вариации метеорологических параметров (рис. 3).

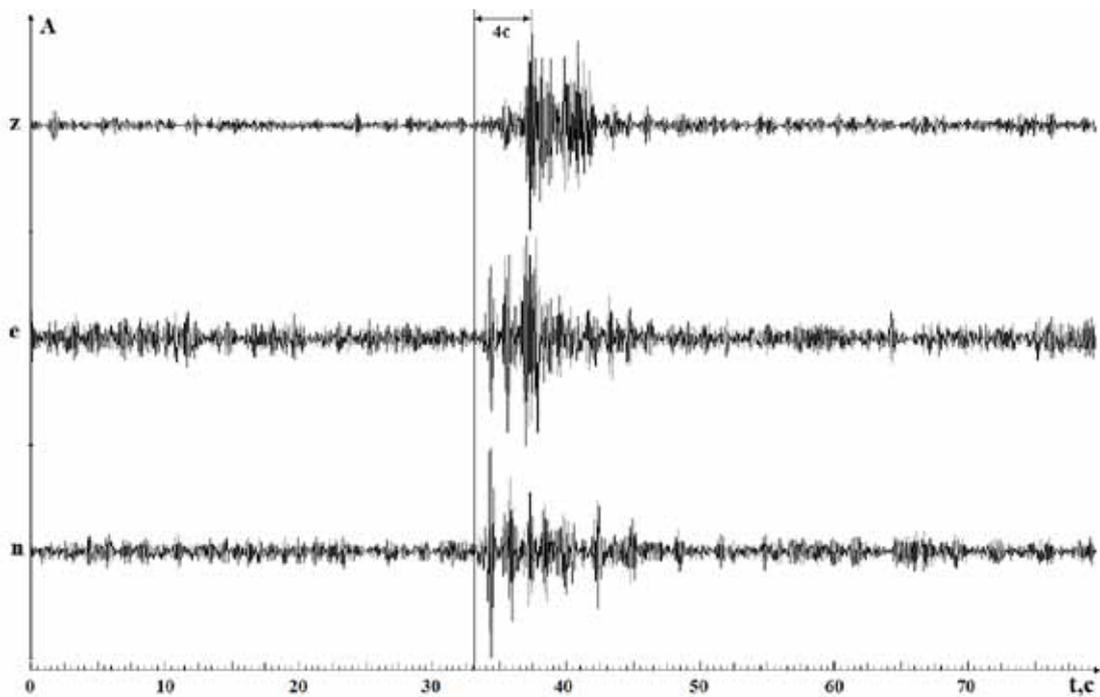


Рис. 1. Сейсмический сигнал при молниевом разряде. Левая вертикальная линия – момент разряда

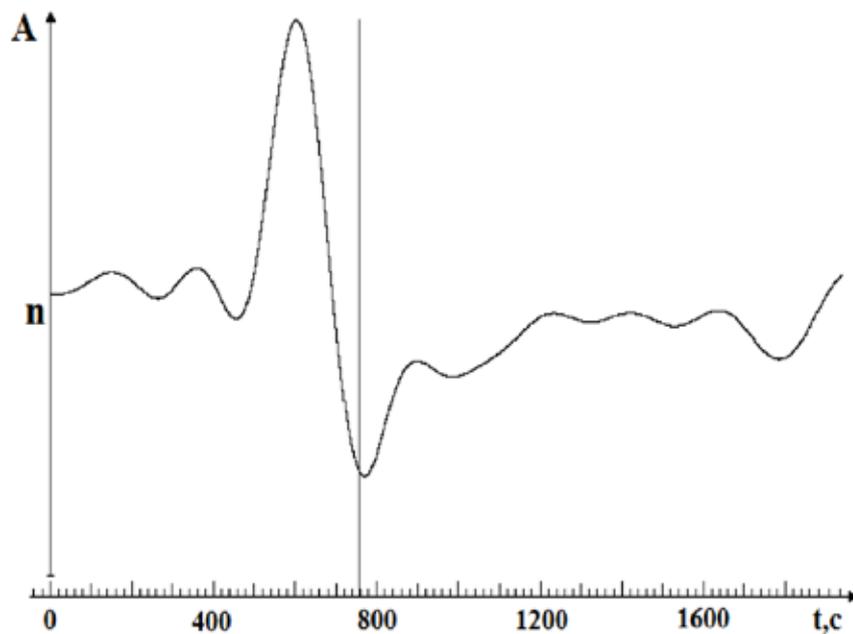


Рис. 2. Меридиональная проекция сейсмического сигнала в низкочастотной области (0.001–0.005 Гц)

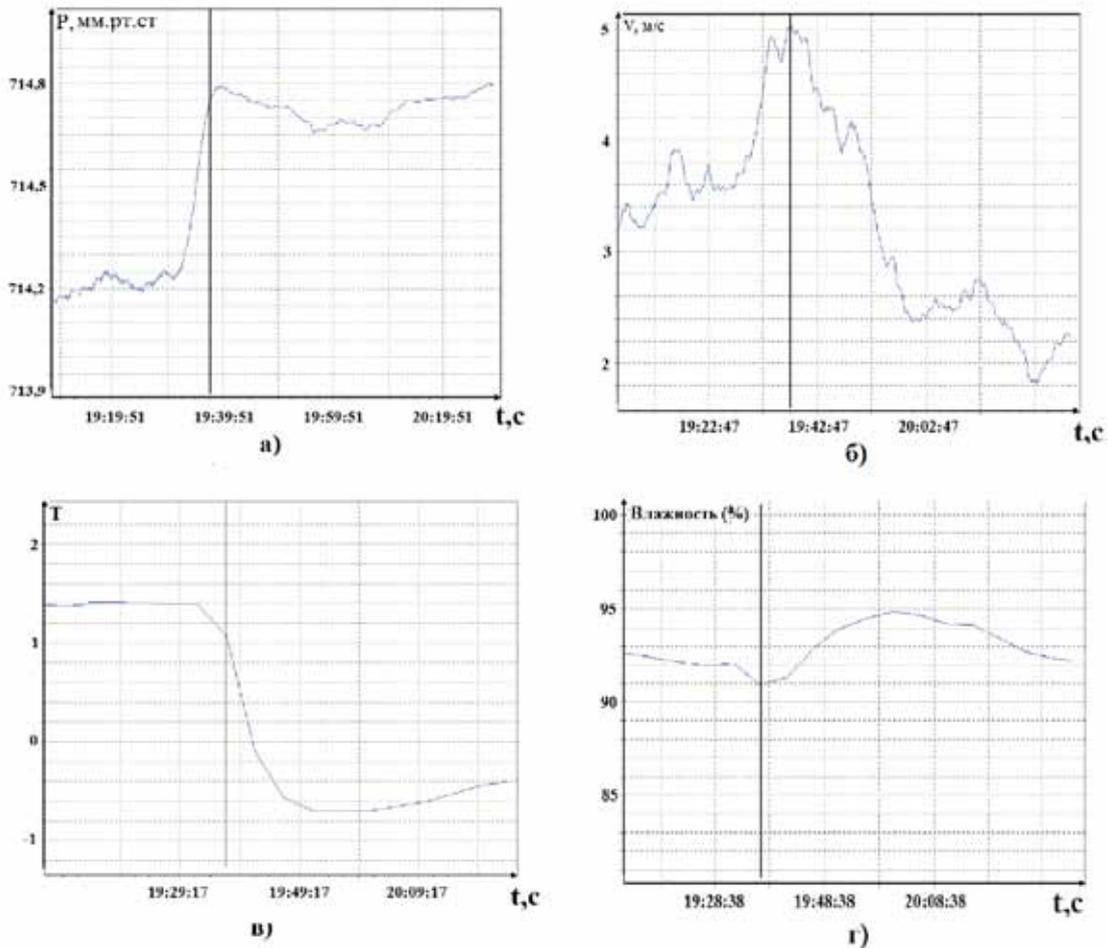


Рис. 3. Вариации метеопараметров на уровне 8 м.:
 а – атмосферного давления; б – скорости ветра; в – температуры; г – влажности.
 Вертикальной чертой отмечено время разряда

Весьма резкое (и сохранившееся затем) изменение температуры воздуха в период грозы зарегистрировано на всех уровнях измерений Высотной метеорологической мачты (8, 25, 73, 121, 217, 301 м). Поэтому имеют веские основания говорить о смене воздушных масс – гроза, по всей видимости, была связана с прохождением атмосферного фронта. Это согласуется с известными и понятными представлениями о том, что грозы в зимних условиях могут происходить только при весьма резко выраженных атмосферных возмущениях достаточно больших масштабов и амплитуды. Насколько известно авторам, сведения о сейсмических проявлениях атмосферных фронтов к настоящему времени практически отсутствуют в литературе, за редким исключением [7].

Вариации давления (рис. 3а) превышают 0.5 мм рт., т.е. порядка 1 мб. Как отмечалось в предыдущем разделе, вариации давления такой амплитуды и продолжительности могут приводить к заметным низкочастотным

сейсмическим сигналам, которые регистрируются, прежде всего, «горизонтальными» сейсмографами. Зарегистрированные сигналы согласуются с этими представлениями и численными оценками.

Высокочастотные и непродолжительные сейсмические сигналы, представленные на рис. 1, имеют, по всей видимости, существенно иную природу. Они, вероятно, отражают непосредственное воздействие акустических сигналов (гром) на поверхность грунта. Отметим, что в ряде недавних работ (например, [8]) сообщалось об экспериментальном обнаружении «эффекта акустосейсмической индукции» – воздействий инфразвука на поверхность Земли, регистрируемых сейсмоприемниками в десятках километров от источников инфразвука.

Сигналы несколько запаздывают после разряда молнии (это, видимо, исключает их непосредственную связь с электромагнитными явлениями при разряде). Отметим, что времена запаздывания у вертикального

и горизонтальных сейсмографов немного различаются (примерно на 4 с). В этой связи полезно иметь в виду, что регистрируемые ими сигналы складываются, как минимум, из двух различных составляющих. Одна из них – сигналы, связанные с непосредственным воздействием акустических волн на грунт вблизи сейсмодатчика. Другая – сейсмические волны, пришедшие из областей, более близких к месту молниевых разрядов (эти области раньше подвергаются акустическому воздействию и от них распространяются сейсмические волны – гораздо быстрее звука в атмосфере). Вертикальные и горизонтальные сейсмографы могут, вообще говоря, быть в разной степени чувствительными к этим двум типам воздействий.

Итак, анализ показывает, что существуют по меньшей мере два разных типа сейсмических сигналов и физических механизмов их генерации при подобных процессах. Один связан с относительно медленными (по сравнению с характерными временами обычно изучаемых сейсмических процессов) вариациями давления под облаками или при прохождении атмосферного фронта. Соответствующие деформации почвы столь же медленны и поэтому локализованы – практически не распространяются в виде сейсмических волн. Другой механизм генерации, видимо, связан с акустическими воздействиями.

Летние грозы характеризуются еще более сильными вариациями давления, и, как следствие, более интенсивными низкочастотными сигналами. Интенсивность молниевой активности также возрастает, и проанализировать отдельный удар грома становится затруднительно. Кроме того, летние грозы обычно сопровождаются сильными ветрами, которые вызывают сильные высокочастотные помехи, маскирующие сигналы от ударов грома.

Задача регистрации смерчей

Особое значение сейсмические сигналы «атмосферного» происхождения могут иметь в связи с проблемой регистрации смерчей и шквалов – интенсивных и опасных метеорологических явлений. Вследствие локальности и быстротечности таких явлений, традиционными средствами очень часто не удается своевременно зарегистрировать даже сам факт их возникновения. Тем более затруднена задача прогноза их развития и перемещения после возникновения.

Смерчи (на Западе их обычно называют торнадо) представляют собой перемещающиеся интенсивные атмосферные вихри с вертикальной в первом приближении осью вращения (рис. 4). Горизонтальные размеры их обычно относительно малы – десятки метров (иногда на один–два порядка больше, иногда – на порядок меньше). Но перепады давления и концентрация кинетической энергии ветра в этих вихрях бывают очень велики, с чем и связаны жертвы и разрушения. Результаты прямых измерений в смерчах, как правило, отсутствуют (в частности, из-за того, что измерительные приборы не выдерживают таких ветровых нагрузок и разрушаются). Но по косвенным данным, скорости ветра могут достигать и превышать 100 м/с. Поэтому жертвы и разрушения бывают весьма значительными. Имеется много свидетельств не только о разрушенных, но и о поднятых в воздух домах, грузовых автомобилях, перевернутых вагонах и др. Продолжительность приземных ураганов ветров нередко составляет считанные минуты, но может быть и значительно больше, а в отдельных случаях достигает нескольких часов. Скорость перемещения смерчей чаще всего порядка нескольких десятков км/час (наблюдались существенные отклонения в ту или иную сторону). Соответственно, длина полосы разрушений бывает от десятков метров до (в отдельных случаях) сотен километров.



Рис. 4. Торнадо в шт. Небраска, США (заимствовано из [9])

Когда речь идет о столь быстротечных локальных явлениях, очевидно, особенно остро стоит вопрос об оперативном реагировании – прогнозе, регистрации, оповещении. Предупреждения, поступившего за одну или несколько минут до прихода ураганного ветра, уже может быть достаточно для заметного уменьшения числа жертв и ущерба. Но существующие методы пока очень далеки от решения подобных проблем. Из-за небольших горизонтальных масштабов и внезапности возникновения, рассматриваемые явления часто не удается своевременно обнаружить с помощью обычных средств – метеорологических локаторов (МРЛ) и спутниковых наблюдений. Например, широко известные «Ивановские» смерчи 9 июня 1984 г., приведшие к значительным жертвам и разрушениям, не были обнаружены МРЛ, хотя один из смерчей прошел вблизи от аэропорта Шереметьево. Не был обнаружен челябинский смерч 15 июня 1991 г., прошедший в 18 км от аэродромного локатора. Даже в США, где регистрации и прогнозу торнадо уделяется очень большое внимание и существует специальная служба, оснащенная современными доплеровскими радиолокаторами, одним из основных источников информации о появлении торнадо являются сообщения случайных наблюдателей. Но и в случаях, когда торнадо все же наблюдаются радиолокаторами, далеко не всегда удается зафиксировать важнейший факт соприкосновения интенсивного вихря с подстилающей поверхностью. (Торнадо чаще всего «спускаются» к поверхности из мощного «материнского облака», и основные разрушения начинаются не раньше их соприкосновения с подстилающей поверхностью). Если с момента этого соприкосновения начинается генерация сейсмических волн, которые с большой скоростью (до 3-5 км/с) распространяются по земной поверхности, то анализ сейсмических сигналов мог бы быть перспективным и даже уникальным способом дистанционной регистрации взаимодействия интенсивных локальных ветров с твердой поверхностью. Заметим, что такая регистрация в принципе может осуществляться сразу на ряде сейсмостанций.

В американской работе [10], вышедшей в середине 90-х годов было приведено около десятка свидетельств очевидцев торнадо, ощущавших колебания почвы иногда на существенных расстояниях от смерча. В частности, приводятся свидетельства профессионального метеоролога, занимающегося преследованием торнадо в качестве «хобби». Он дважды непосредственно ощущал колебания почвы, находясь на расстояниях порядка

мили от торнадо. Другой очевидец даже оценивает период колебаний почвы – в его случае он составлял порядка 10 с. Естественно предположить, что использование современной техники регистрации сейсмических сигналов должно давать возможность обнаружить подобные колебания заблаговременно и на достаточных расстояниях от источника. Имея в виду большую скорость распространения сейсмических сигналов, это означало бы заметное расширение возможностей своевременного обнаружения и оповещения о соответствующих опасных явлениях.

В работе [10] и некоторых последующих работах [11, 12] был выражен большой энтузиазм в связи с этими новыми возможностями. Оказалось, что еще в давней работе [13] проявления торнадо были обнаружены на сейсмограммах 1927 г.! В [11, 12, 14] был упомянут ряд эпизодов с сейсмическими сигналами, совпадающими по времени с торнадо в США, и в какой-то степени проанализированы некоторые из этих эпизодов. Авторы работы [10, 11] даже сообщили о создании коммерческой фирмы, призванной обеспечивать всех желающих недорогими портативными сейсмографами, способными оперативно сигнализировать о приближении торнадо. Но затем публикационная активность в этой области заметно упала. Мы не исключаем, что сейсмические сигналы, совпадающие по времени с торнадо, могли в каких-то случаях быть вызваны не непосредственно самими вихрями, а порождающими торнадо (или соседними) облачными системами, как это описано в первом разделе настоящей статьи. В таких случаях прогностическая ценность этих сигналов может быть невелика, поскольку, как упоминалось выше, медленные деформации грунта локализованы под соответствующими облаками и не генерируют достаточно интенсивные распространяющиеся сейсмические волны.

В конце февраля 2012 г. произошло событие, которое на некоторое время вызвало новый всплеск энтузиазма. Интенсивный торнадо прошел в США через большую и плотную сеть сейсмостанций (приготовленную для решения некоторых других сейсмологических задач). В течение одной-двух недель марта 2012 г. это вызвало множество сообщений и комментариев в Интернете (см., например, [15]). Сообщалось, в частности, о «необычных сигналах, зарегистрированных тремя сейсмостанциями». Но, возможно, в итоге это событие не привело к появлению какой-либо качественно новой информации: после многих поверхностных комментариев, пока не появились, насколько нам известно, серьезные научные публикации, относящиеся к этому эпизоду.

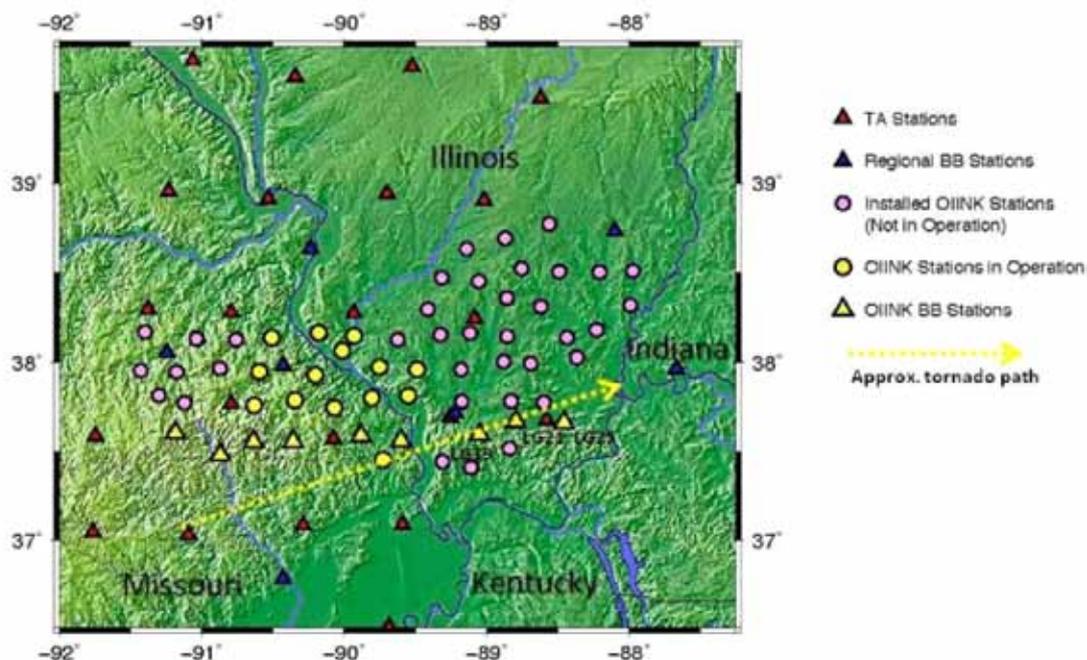


Рис. 5. Траектория торнадо, прошедшего 29 февраля 2012 г. через сеть сейсмостанций Университета штата Индиана (различные типы сейсмостанций обозначены разными треугольниками и кружками) [15]

Относительно недавно, 23 мая 2013 г., смерч прошел через г. Обнинск в 2-3 километрах от сейсмостанции (рис. 6). Появилась редкая возможность непосредственно оценить перспективы сейсмической регистрации смерчей. Авторы исследовали за-

регистрированные сейсмические сигналы в период «жизни» смерча в различных частотных диапазонах (от 0,001 до 18 Гц). Заметные сигналы удалось обнаружить лишь на одной из «горизонтальных» сейсмограмм в частотном интервале 5-7 Гц (рис. 7).

а б



Рис. 6. Любительская фотография обнинского смерча 23.05.13 (слева – Высотная метеорологическая мачта ИЭМ) (а); пни от поваленных деревьев у дома одного из авторов статьи, на расстоянии 2-3 км от сейсмостанции (б)

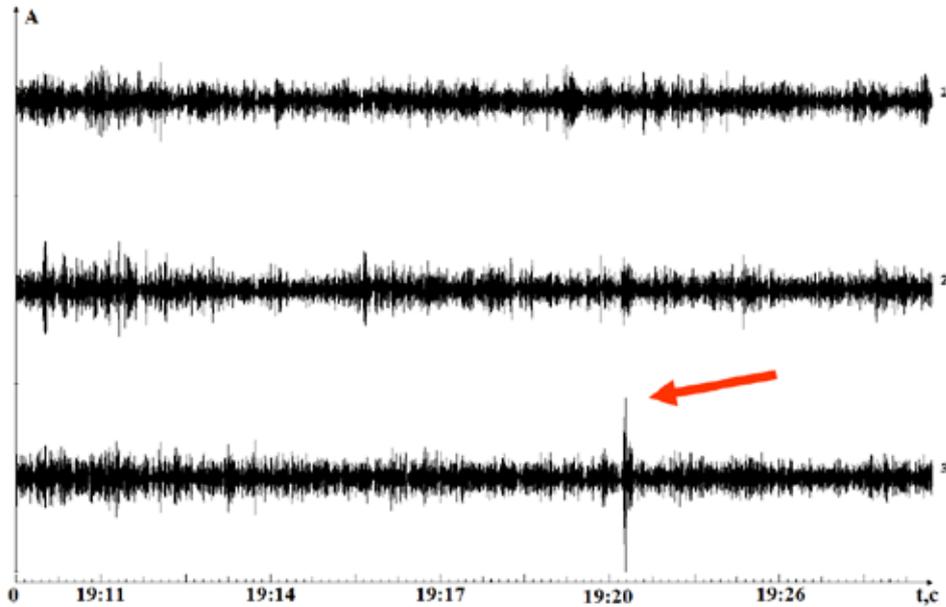


Рис. 7. Три проекции сигнала (сейсмостанция «Обнинск») в интервале 5-7 Гц. Стрелкой обозначен сигнал, отвечающий времени прохождения смерча. По горизонтальной оси отложено московское время

В других частотных интервалах не удалось обнаружить заметные сигналы. Поэтому с точки зрения перспектив практического использования сейсмической регистрации смерчей, в целом, результат по этому эпизоду приходится расценивать, скорее, как отрицательный. В нашей стране, где повторяемость и интенсивность смерчей намного меньше, чем в США, вероятно, не стоит прилагать большие усилия для организации их сейсмического мониторинга.

Тропические циклоны влияют на сейсмическую активность?

Уже несколько десятилетий изучаются «штормовые микросейсмы» – слабые сейс-

мические сигналы, связанные со штормами над большими акваториями. Во многих случаях генерацию штормовых микросейсм связывают с тропическими циклонами (ТЦ). Это – гигантские атмосферные вихри со скоростями ветра до нескольких сотен километров в час, см. рис. 8. ТЦ относятся к числу наиболее опасных стихийных бедствий, отличаясь от циклонов умеренных широт несколько меньшими горизонтальными размерами, но гораздо большей интенсивностью (скоростью ветра, горизонтальными перепадами давления и осадками). В тихоокеанском регионе их принято называть тайфунами, а в Атлантике – ураганами.



Рис. 8. Тропический циклон Катарина, наблюдавшийся 26 марта 2004 г. на юге Атлантического океана около Бразилии. Фото Международной космической станции NASA

Физические механизмы генерации штормовых микросейсм – вопрос до сих пор во многом дискуссионный. Эти слабые, но далеко распространяющиеся сигналы не без успеха пытаются использовать в качестве одного из источников информации о тропических циклонах [16]. Объем настоящей статьи не позволяет на этом подробно останавливаться. Ниже речь пойдет о другом: не могут ли такие исключительно интенсивные процессы как ТЦ влиять на земную кору более существенно, например, «провоцировать» землетрясения. Тем более, что под Тихим океаном земная кора – относительно тонкая и «уязвимая». Здесь уместно отметить, что кинетическая энергия одного тропического циклона оценивается величиной в 10^{18} Дж того же порядка, что суммарная годовая энергия всех землетрясений на земном шаре [18]!

К настоящему времени имеется ряд статистических исследований, которые поддерживают такие предположения [17–20]. Остановимся на некоторых относящихся сюда результатах.

Тропические циклоны возникают и «живут» над теплым океаном, поэтому их активность зависит от сезона (меняется и от сезона к сезону) и, конечно, от географических условий. Например, в Северном и Южном полушариях она, естественно, «находится в противофазе». Влияние циклонов на сейсмическую активность было бы подтвержде-

но, если бы удалось выявить аналогичные зависимости и для землетрясений. Это сделано в ряде недавних работ одного из авторов [17–19].

Чтобы сопоставлять временные и пространственные вариации сейсмической и «циклонической» активности, необходимо, прежде всего, иметь количественные показатели того и другого. Показатели интенсивности сейсмической активности, основанные на энергии землетрясений разных классов, выработаны давно. В последние годы в работах автора [17–19] предложена система количественных показателей «циклонической» активности, основанная на интегральных оценках кинетической энергии циклонов. Это позволило сравнивать с ней сейсмическую активность в тех же регионах. На рис. 9 сопоставлен сезонный ход активности тропических циклонов и сейсмической активности в северо-западной части Тихого океана [18] для землетрясений различных классов (различных диапазонов магнитуды M^1). Нормировка разных количественных показателей активности различна и выбрана из соображений удобства сопоставления всех результатов на одном рисунке. Видно, что сейсмическая активность заметно скоррелирована с циклонической.

¹Магнитуда землетрясения – условная величина, пропорциональная логарифму энергии землетрясений.

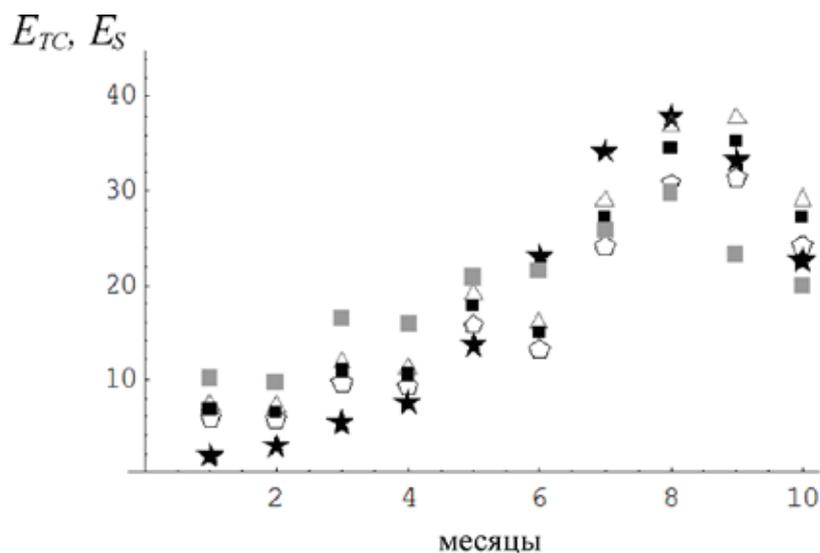


Рис. 9. Сглаженные графики среднемесячных значений циклонической активности рассчитанной по 1945 – 2007 гг (обозначено звездами) и сейсмической энергии E_s для различных диапазонов интенсивности землетрясений: $M > 5$ (за период 1980–2007 гг., треугольники, $k=5$); $M > 5.5$, (1980–2007 гг., черные квадраты, $k=4.7$); $M \geq 6.0$ (1980–2007 гг., пятиугольники, $k=4.2$); $M \geq 6.0$ (1963–2007 гг., серые квадраты, $k=4.3$)

На рис. 10 сопоставляются вариации сейсмической и циклонической активности в течение 20 лет (перед 2007 г.) [19]. Результаты дают основания предполагать, что тропические циклоны, воздействуя на земную кору, «провоцируют» слабые землетрясения. Тем самым, они «разряжают обстановку», так что интенсивных землетрясений становится меньше.

$^{\circ}$ N – (120–150) $^{\circ}$ E] (кривая 2; обе эти кривые относятся к области значительной циклонической активности над океаном); [(25–40) $^{\circ}$ N – (60–90) $^{\circ}$ E] – (кривая 3 – Таджикистан, Афганистан, Пакистан и юго-восточные районы Туркмении и Узбекистана); [(20–50) $^{\circ}$ N – (55–100) $^{\circ}$ E] (кривая 4 – восточная часть Туркмении, Узбекистан, Таджикистан, Киргизия, восточный

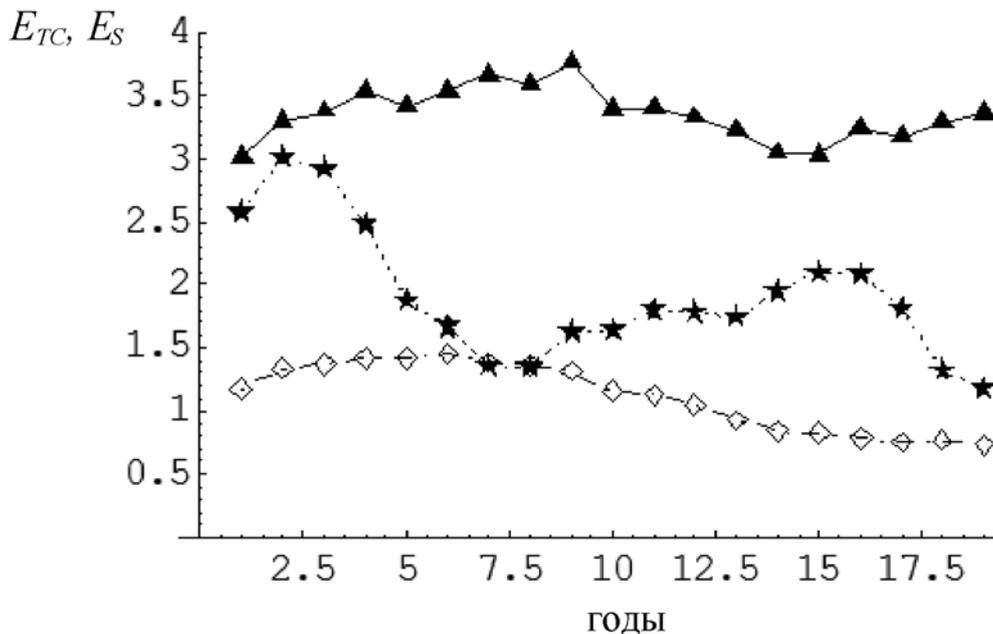


Рис. 10. Сглаженные графики различным образом нормированных сезонных значений циклонической активности E_{TC} (треугольники) и годовых значений сейсмической энергии E_S ($6 \leq M < 7$ – звезды, $4 \leq M < 5$ – ромбы)

Еще одно свидетельство влияния ТЦ на сейсмическую активность – заметная сезонная изменчивость последней над тропическим океаном по сравнению с аналогичными вариациями над континентом [19]. На рис. 11 представлены отношения суммарной сейсмической энергии за период с 1 июля по 30 сентября ($E_{S(7-9)}$) к той же величине за период с 1 января по 31 марта ($E_{S(1-3)}$). Значения суммарных энергий задаются диапазоном магнитуд до величины магнитуды, обозначенной на горизонтальной оси рисунка. Здесь максимальная магнитуда равна 6.2. Эти отношения сейсмических энергий, рассчитаны по территориям, ограниченными координатами: [(15–45) $^{\circ}$ N – (130–155) $^{\circ}$ E] (кривая 1); [(10–40)

Иран, Афганистан, Пакистан, частично Северная Индия, западный Китай, Монголия, юг Казахстана). Большая «изрезанность» графиков отношений энергий связана с тем, что с каждым шагом роста верхней границы диапазона магнитуд быстро падает число добавляемых землетрясений, но одновременно и сильно растет их энергетический «вес». Из графиков рис. 11 следует, что, по крайней мере, в диапазонах обозначенных магнитуд, в зонах действия тропических циклонов, в июле – сентябре, то есть в период интенсивной циклонической активности, сейсмическая активность увеличивается. Для континентальных же районов в эти месяцы сейсмическая активность, наоборот, понижается.

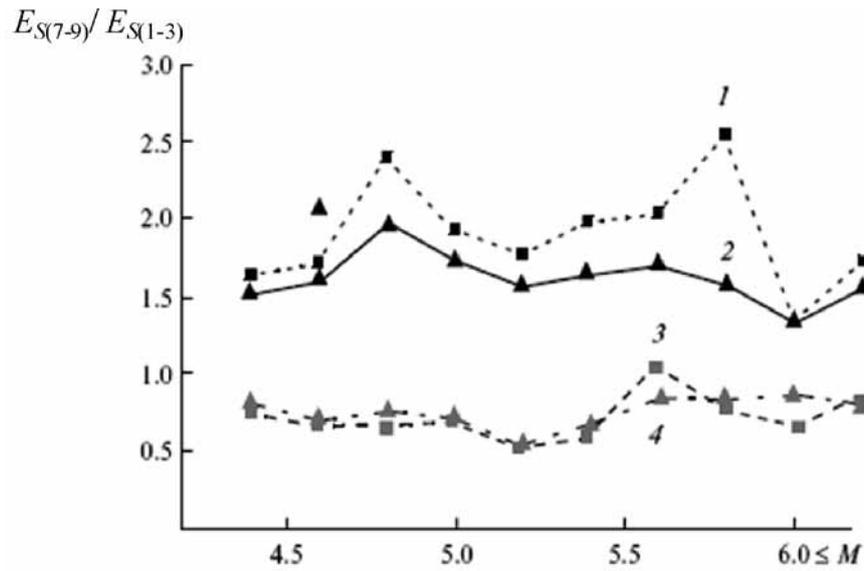


Рис. 11. Отношения суммарных сейсмических энергий землетрясений в зависимости от диапазона значений магнитуд и территорий

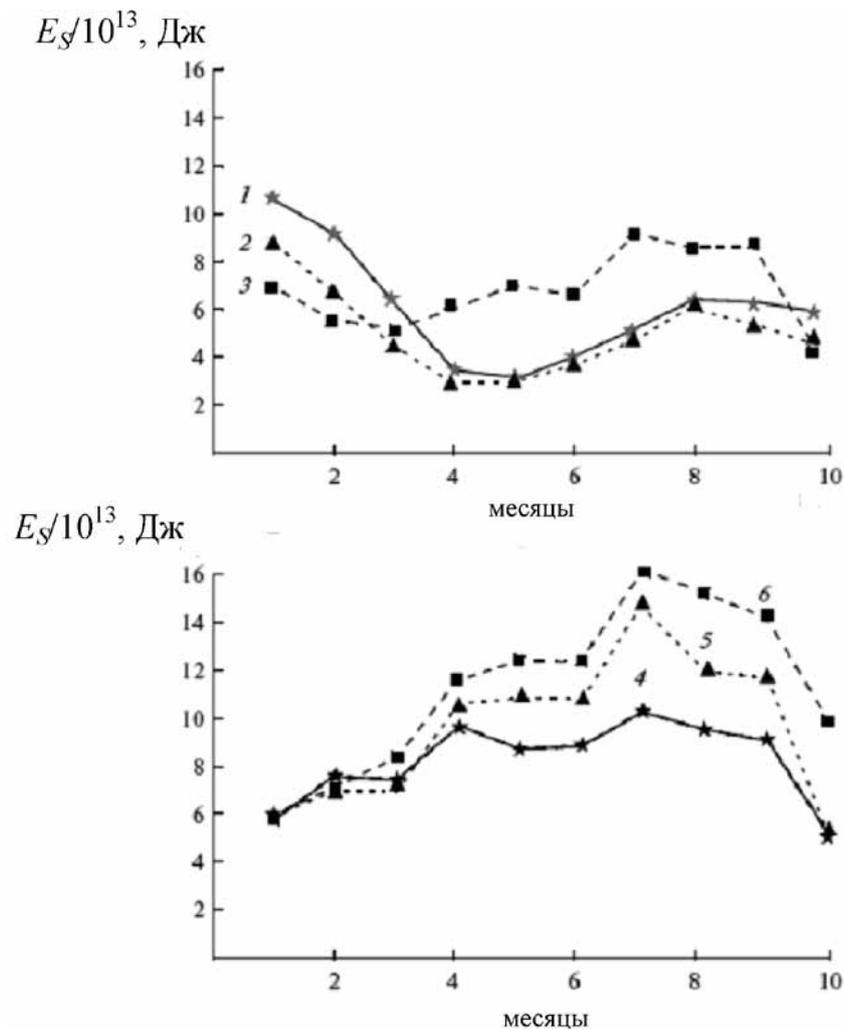


Рис. 12. Сглаженные годовые графики среднемесячных значений сейсмической энергии, рассчитанных по землетрясениям с $M \leq 6.5$, произошедшим в период 1999 – 2008 гг. [18]

Другое показательное сравнение – зависимость сейсмической активности от широты при постепенном переходе от Южного полушария к Северному [18]. Исследовалась внутрисезонная динамика среднемесячных значений сейсмических энергий для одинаковых по площади акваторий, для разных широт. На рис. 12 приведены сглаженные графики среднемесячных энергий для шести акваторий, каждая размером $25^\circ \times 25^\circ$. У этих областей одинаковые границы по долготе -120°E , 145°E . По широте самая южная территория ограничена 10°S и 15°N . Далее каждая последующая область смещается на север с шагом в 5° . В данном случае учитывались только землетрясения с $M \geq 6.5$, произошедшие в 1999–2008 гг. По мере смещения рассматриваемых областей на север заметно меняется характер графиков – все сильнее проявляется рост сейсмической активности в летне-осенние месяцы (кривые 4, 5, 6). В областях, в которых южные широтные границы расположены южнее экватора и на экваторе наблюдаются два усиления сейсмической активности: в летне-осенние месяцы и в начале года (кривые 1, 2, 3). При этом по мере «ухода» из Южного полушария на север сейсмическая активность в начале года постепенно ослабевает и усиливается летне-осенняя сейсмическая активность. Иначе говоря, рис. 12 демонстрирует, что сезонный ход сейсмической активности в Северном и Южном полушариях находится в противофазе, как и активность тропических циклонов.

В наших работах [21, 22] обсуждаются некоторые физические механизмы воздействия циклонов на сейсмическую активность.

Приведенные выше результаты позволяют сделать вывод, что атмосферные процессы не только приводят к генерации сейсмических сигналов, доступных для регистрации, но, видимо, могут влиять и на сейсмическую активность. Это представляет не только научный интерес – просматриваются перспективы и практического использования сейсмических сигналов, вызванных воздействиями атмосферных процессов, а также потребности учета воздействий таких процессов на сейсмическую активность – энергию землетрясений, их распределение по пространству и времени.

Список литературы

1. Феофилактов В.Д. Помехи в длиннопериодной сейсмографии. – М.: Наука, 1977. – 100 с.
2. Природные опасности России. Т.5. Гидрометеорологические опасности. Под ред. Г.С. Голицына и А.А. Васильева. – М.: Крук, 2001. – 296 с.
3. Ингель Л.Х., Ярошевич М.И., Бабкина В.Ф. О сейсмических проявлениях конвективной облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40. № 5. – С. 689–695.
4. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986. Т.1. – 396 с.
5. Шметер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 287 с.
6. Yaroshevich M.I., Ingel L.Kh., Lysenko D.A. On seismic manifestations of intensive atmospheric processes In: «Fluxes and Structures in Fluids». Proc. Intern. Conf. S.-Petersburg, June 2013. – М.: МАКС Пресс. 2013. – P. 333–335.
7. Локтев Д.Н. Воздействие атмосферных фронтов на структуры земной коры // Сейсмоакустические эффекты при грозовой активности // В сб. «Геофизика межгеосферных взаимодействий». Под. ред. В.В. Адушкина. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 79–86.
8. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 387 с.
9. Пашицкий Э.А. Вихри вокруг нас // Природа. – 2011. – №10. – С.3–13.
10. Tatom F.B., Knupp K.R., Witton S.J. Tornado detection based on seismic signal // J. Appl. Meteorol. 1995. V. 34. N 2. P. 572582.
11. Tatom F.B., Witton S.J. The transfer of energy from tornado into the ground // Seism. Res. Lett. 2001. V. 72. N 1. P. 12–21.
12. Vincent R.K. et al. Wavelet-packet transformation analysis of seismic signals recorded from a tornado in Ohio // Bull. Seism. Soc. Amer. 2002. V. 92. N 6. P. 2352–2368.
13. Kisslinger C. Seismograms associated with the near passage of tornadoes // J. Geophys. Res. 1960. V. 65. N 2. P. 721–728.
- Ингель Л.Х., Феофилактов В.Д., Ярошевич М.И. Регистрация сейсмических сигналов, связанных с торнадо // Докл. РАН. 2002. Т. 386. № 6. С. 813–817.
15. <http://www.redorbit.com/news/science/1112490869/tornadoes-and-seismic-activity/>
16. Ebeling C.W. Inferring ocean storm characteristics from ambient seismic noise: A historical perspective // Advances in Geophysics, 2012. V. 53. P. 2–32.
17. Ярошевич М.И. Некоторые особенности динамики циклонической и сейсмической активности в северо-западной части Тихого океана // Докл. РАН. – 2008. Т. 421. – № 1. – С. 787–791.
18. Ярошевич М.И. Тропические циклоны как возможный фактор, влияющий на сейсмическую активность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана // Изв. РАН. Физика Земли. – 2011. – № 7. – С. 80–85.
19. Ярошевич М.И. Тропические циклоны и сейсмическая активность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 3. – С. 66–77.
20. Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Соболев Д.Г. К вопросу о влиянии циклонов на сейсмичность // Вулканология и сейсмология. – 2012. – № 2. – С. 27–38.
21. Гарагаш И.А., Ингель Л.Х., Ярошевич М.И. Об одном возможном механизме влияния атмосферных процессов на сейсмическую активность вблизи берегов океанов // Физика Земли. 2004. – № 8. – С. 91–96.
22. Ингель Л.Х., Ярошевич М.И., Петрова Л.И. О механизме воздействия тропических циклонов на земную кору // Докл. РАН. 2009. – Т. 425. – № 5. – С. 674–677.