

АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2021 г. А. А. Спивак¹, *, Ю. С. Рыбнов¹

¹Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: aaspivak100@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.2020 г.

После доработки 29.06.2020 г.

Принята к публикации 04.07.2020 г.

Приведены результаты инструментальных наблюдений за акустическими эффектами ряда сильных землетрясений, произошедших в Албании, Греции, Иране и Турции с магнитудой в интервале 5.1–6.9. Наблюдения выполнены в трех пунктах: Геофизической обсерватории “Михнево” (54.94° N; 37.73° E), в Центре геофизического мониторинга г. Москвы (55.70° N; 37.57° E) Института динамики геосфер Российской академии наук и в пункте, расположенном в г. Звенигород Московской области (55.69° N; 36.77° E), что обеспечивало пеленги на источники акустических возмущений. Показано, что землетрясения с очагами, расположенными на расстояниях от ~1845 до ~2815 км от пунктов регистрации, вызывают возмущения атмосферы в виде распространяющихся в стратосферном волноводе акустических колебаний инфразвукового диапазона частот, а также в виде акустических колебаний, вызванных сейсмическими волнами. Приведены характерные периоды вызванных землетрясениями акустических сигналов. Выполнена оценка энергий акустического источника и землетрясения по спектральным характеристикам распространяющихся в стратосферном волноводе инфразвуковых сигналов.

Ключевые слова: землетрясение, атмосфера, атмосферное давление, вариации, акустические колебания.

DOI: 10.31857/S0002333721010099

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных проявлений сильных землетрясений являются акустические возмущения в приземной атмосфере [Гармаш и др., 1989; Швед и др., 2018]. Возмущения связаны с сопутствующими сейсмическим событиям вертикальными смещениями земной поверхности [Голицын, Кляцкин, 1967; Шалимов и др., 2019; Cook, 1971; Takahashi et al., 1994; Jones et al., 2017; Mutschlechner, Whitaker, 2005]. В ряду других природных и техногенных явлений землетрясения следует рассматривать в качестве одного из заметных источников акустических, в частности, инфразвуковых колебаний в атмосфере [Benioff, Gutenberg, 1939; Сорокин, Ключевский, 2019].

Повышенный интерес к изучению акустических возмущений, вызванных землетрясениями, появился после анализа последствий Аляскинского землетрясения 27.03.1964 г. с магнитудой 9.0. Результаты наблюдений показали, что землетрясение сопровождалось хорошо выраженными инфразвуковыми колебаниями [Bolt, 1964; Donn, Posmentier, 1964; Mikumo, 1968; Young, Green, 1982]. Однако известны и более ранние исследования, в которых рассматривались акустические эффекты сильных землетрясений [Пасечник, 1959; Benioff et al., 1951].

По результатам исследований выделяется два основных источника акустических возмущений в атмосфере при землетрясениях: вертикальные движения грунта в точке наблюдений в период прихода поверхностных сейсмических волн [Artur et al., 2004; Bolt, 1964; Donn, Posmentier, 1964; Kim et al., 2004; Mikumo, 1968; Watada et al., 2006] и движение земной поверхности в эпицентральной зоне землетрясения при дальнейшем распространении инфразвуковых возмущений вдоль земной поверхности в атмосферных волноводах и регистрируемых на значительных расстояниях от очага землетрясения [Douglas, 2005; Mikumo, 1968]. В качестве дополнительного (вторичного) источника инфразвуковых волн при землетрясениях, которые регистрируются на далеких расстояниях от очага события, рассматриваются колебания крупных горных систем, в случае их возбуждения поверхностными сейсмическими волнами [Le Pichon et al., 2003; Young, Greene, 1982].

Считается, что инфразвуковые колебания возникают в основном при мелкофокусных землетрясениях. Однако имеющиеся данные свидетельствуют о том, что инфразвуковые колебания в атмосфере могут вызываться также широкофокусными мантийными землетрясениями [Che et al., 2013].

Таблица 1. Перечень рассмотренных событий

№ п/п	Дата	Страна	Магнитуда	Время (UTC)	Координаты	Глубина, км
1	26.11.2019	Албания	$m_b = 5.1$	02:59	41.40° N 19.54° E	~10
2	24.05.2014	Греция	$M_w = 6.9$	09:25	40.29° N 25.34° E	~11
3	20.03.2019	Турция	$m_b = 5.7$	06:34	37.43° N 29.44° E	~5.6
4	24.01.2020	Турция	$M_w = 6.8$	17:55	38.37° N 39.22° E	~15
5	23.02.2020	Турция	$M_w = 5.7$	05:53	38.44° N 44.49° E	~10
6	06.01.2019	Иран	$M_w = 5.6$	13:41	33.96° N 45.61° E	~6.4
7	08.07.2019	Иран	$m_b = 5.7$	07:00	31.83° N 49.55° E	~10

Частотный диапазон регистрируемых при землетрясениях акустических колебаний заключен в диапазоне частот 0.005–10 Гц, их амплитуда изменяется от ~0.1 до нескольких Па. При этом инфразвуковые волны могут регистрироваться на расстояниях до 10^4 км и более [Le Pichon et al., 2010].

Важность изучения атмосферных движений, вызванных землетрясениями, определяется необходимостью дальнейшего понимания общей картины развития сейсмических событий, разработки теоретических моделей, учитывающих все их проявления, а также дискриминации техногенных источников, например, взрывов [Bedart, Georges, 2000]. Интерес к акустическим эффектам землетрясений связан также с необходимостью решения вопроса, связанного с энергообменом в системе литосфера–атмосфера, то есть вопроса, касающегося межгеосферных взаимодействий в целом. Действительно, как неоднократно подчеркивалось, воздействие землетрясений на верхние геосферы, в частности ионосферу, осуществляется посредством акустико-гравитационных волн [Гармаш и др., 1989; Гохберг, Шалимов, 2008; Гохберг и др., 2014; Черногор, 2019; Шалимов и др., 2017; Astafyeva, Afraimovich, 2006; Jones et al., 2017; Liu, Klostermeyer, 1975; Sun et al., 2016]. Акустические колебания, в частности акустико-гравитационные волны, возбуждаемые землетрясениями, являются основным фактором, определяющим перенос энергии на ионосферные высоты.

В настоящей работе приводятся результаты инструментальных наблюдений за акустическими эффектами ряда сильных землетрясений, произошедших в ближайших к пунктам регистрации

зонах сейсмической активности (Албания, Греция, Иран и Турция) с магнитудой в интервале 5.1–6.9. Инструментальные наблюдения за акустическими возмущениями, вызванными землетрясениями, выполнялись на значительных расстояниях от очага сейсмического события, превышающих 2700 км.

При выборе объектов исследований учитывалось наличие в этот период спокойной метеорологической обстановки как в пунктах наблюдения, так и вдоль трасс распространения акустических сигналов. Также важно, что при рассматриваемых событиях вызванные землетрясением акустические сигналы, распространяющиеся в атмосферном волноводе, уверенно выделялись на фоне естественных микробарических вариаций (особенность распространения акустических сигналов в атмосферных волноводах заключается в наличии чередующихся с расстоянием зон тени и уверенного приема [Адушкин и др., 2019; Куличков и др., 2004]). Перечень рассмотренных землетрясений приведен в табл. 1.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При выполнении исследований использовались результаты акустических наблюдений, выполняемых постоянно в Геофизической обсерватории “Михнево” (МНВ) ИДГ РАН (координаты: 54.94° N; 37.73° E), Центре геофизического мониторинга (CGM) г. Москвы (координаты: 55.71° N; 37.57° E), а также в пункте, расположенном в г. Звенигород Московской области (ZVE) с координатами: 55.69° N; 36.77° E [Адушкин и др., 2016;

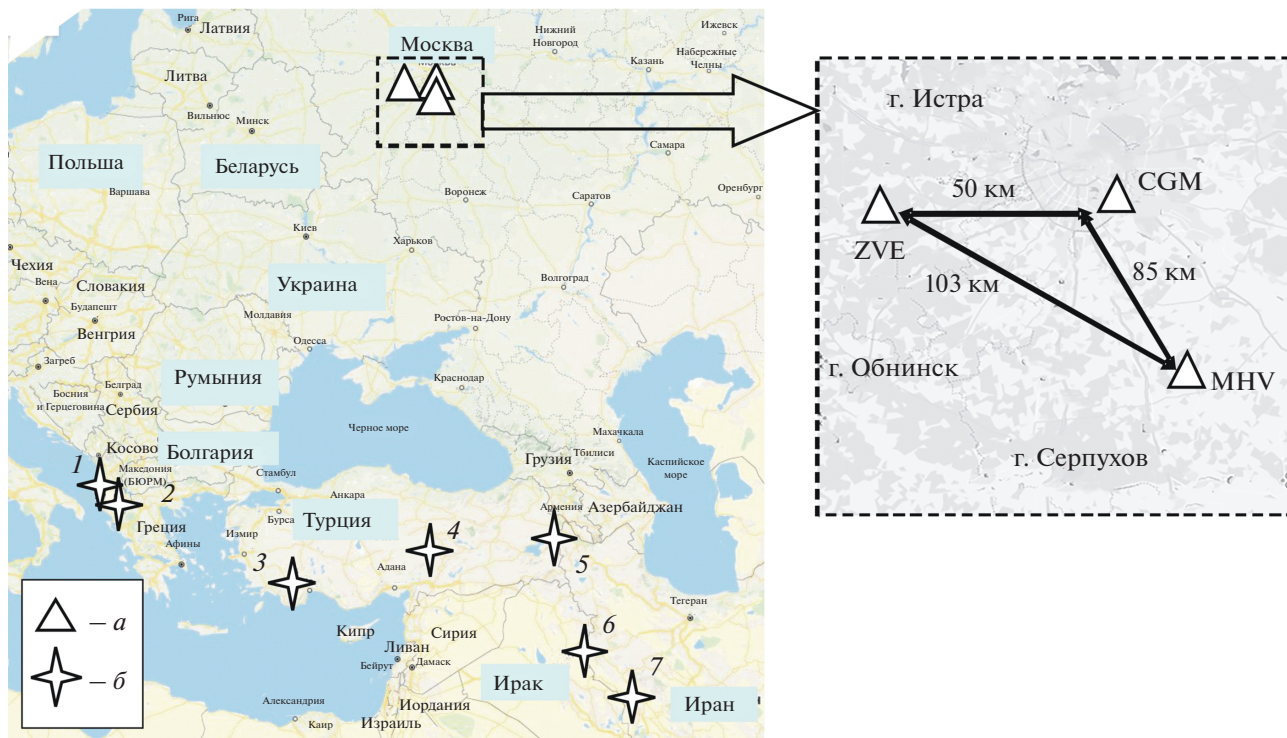


Рис. 1. Расположение пунктов акустической регистрации – *a* и сейсмических событий – *b*; нумерация землетрясений соответствует номеру в табл. 1.

Спивак и др., 2016]. Расположение пунктов регистрации и очагов землетрясений приведено на рис. 1. Пункты располагались в вершинах треугольника со сторонами 50, 85 и 103 км.

Данные инструментальных наблюдений представляли собой цифровые ряды атмосферного давления P_0 и микробарических вариаций P . Измерение указанных величин выполнялось на земной поверхности с использованием автоматизированной цифровой метеостанции Davis Vantage Pro 2 и микробарометра МБ-03, обеспечивающего устойчивую регистрацию акустических сигналов амплитудой от 0.01 до 200 Па в диапазоне частот 0.0003–10 Гц. Результаты регистрации выложены на сайте ИДГ РАН в графическом и цифровом видах РАН (www.idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/). Для анализа формировались цифровые ряды записей с дискретностью 0.05 с.

С целью выделения полезных сигналов при анализе микробарических вариаций применялся Multi-Channel Correlation Method [Causi, 1995], который позволял выделять низкоамплитудные когерентные волновые сигналы на фоне некогерентного микробарического шума [Le Pichon et al., 2002]. Здесь следует отметить хорошее совпадение формы и спектральных характеристик сигналов, регистрируемых в разных пунктах наблюдений. При этом регистрация распространяющихся в атмосферном волноводе инфразвуковых волн

синхронно в трех пунктах позволяла определять пеленг на источник. Это, а также оценка скорости распространения сигнала на основе данных о расстоянии и времени его прихода в пункты регистрации позволяли идентифицировать сигнал, источником которого является рассматриваемое сейсмическое событие.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Акустические эффекты всех рассмотренных в настоящей работе сейсмических событий имеют сходный характер. На первом этапе регистрируются достаточно высокочастотные акустические возмущения, вызванные приходом в пункты регистрации сейсмического сигнала. Затем с известным запозданием регистрируются инфразвуковые волны, вызванные возмущениями атмосферы в эпицентральной зоне землетрясения и распространяющиеся в атмосферном волноводе. Ниже будут рассмотрены наиболее характерные примеры акустических возмущений, вызванных землетрясениями, перечисленными в табл. 1.

Акустические колебания, вызванные сейсмическими волнами от землетрясений, рассмотрим более детально на примере двух событий: 06.01.2019 г. и 08.07.2019 г.

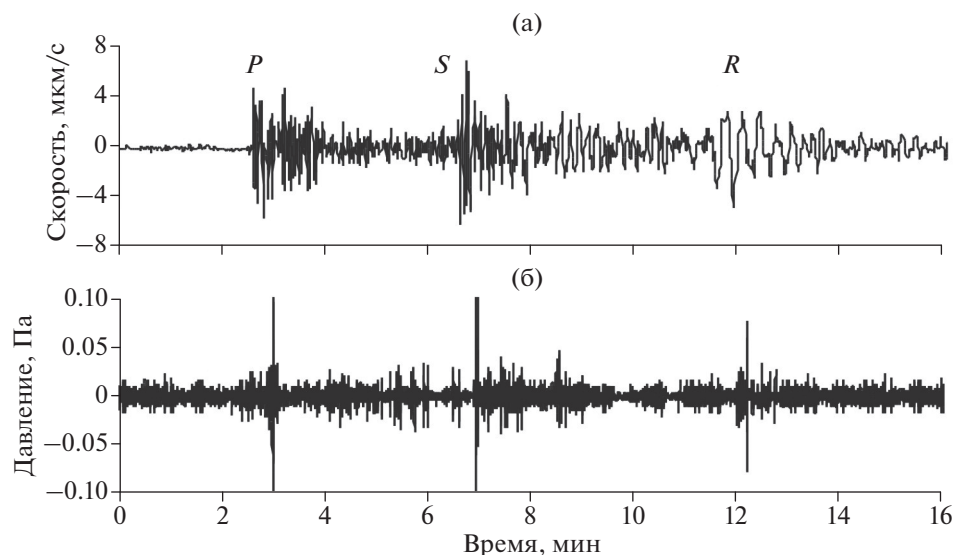


Рис. 2. Результаты регистрации вертикальной компоненты движения свободной поверхности в МНУ, вызванных землетрясением 06.01.2019 г. (а), и микробарических вариаций, вызванных сейсмическим сигналом (б).

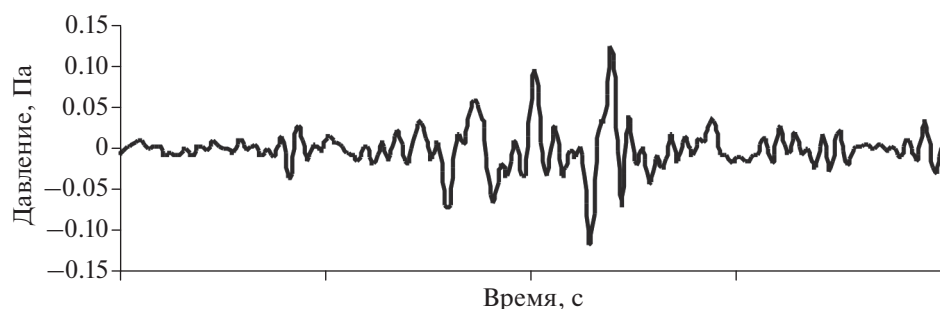


Рис. 3. Акустический сигнал, вызванный P -волной.

Землетрясение 06.01.2019 г. с магнитудой $M_w = 5.6$ произошло в Иране в 13:41:57 UTC на глубине ~ 5.6 км. Координаты события $33^{\circ}57'36''$ N; $45^{\circ}36'36''$ E.

На рис. 2 приведены формы сейсмического и акустического сигналов, зарегистрированных в МНУ на расстоянии ~ 2411 км от эпицентра события. Объемные сейсмические волны P и S пришли в МНУ соответственно в 13:46:45 UTC и в 13:50:36 UTC. Приход сейсмической поверхностной Lg -волны зарегистрирован в 13:55:39 UTC.

Регистрация микробарических вариаций показала, что в данном случае отчетливо наблюдаются акустические сигналы, сопутствующие всем типам сейсмических волн, что хорошо видно из рис. 2.

Акустические сигналы, вызванные объемными сейсмическими волнами P , S и поверхностными волнами R , имеют форму цуга, состоящего из нескольких периодов с нарастающей и затем убывающей

амплитудой и короткой длительностью соответственно ~ 5 , ~ 2 и ~ 1.5 с (в качестве иллюстрации на рис. 3 приведена форма акустического сигнала, вызванного сейсмической P -волной).

Следует отметить, что длительности акустических сигналов T и их характерные частоты f не совпадают с длительностями T_D и характерными частотами f_S соответствующих сейсмических волн. Это хорошо видно из табл. 2, в которой приведены в качестве примера значения перечисленных параметров для сигналов, зарегистрированных в МНУ. Как это следует из данных табл. 2, длительности акустических сигналов в целом существенно меньше по сравнению с длительностью соответствующих сейсмических сигналов. Во-вторых, наблюдаемая значительная разница между характерными частотами объемных сейсмических волн P и S и поверхностной волной отсутствует для акустических сигналов.

Землетрясение 08.07.2019 г. с магнитудой $M_w = 5.6$ произошло на западе Иране в 07:00:32 UTC на глубине ~ 10 км. Координаты события $31^\circ 49' 48''$ N; $49^\circ 33' 00''$ E.

На рис. 4 приведены результаты сейсмической регистрации, выполненные в МНУ на расстоянии ~ 2733 км от эпицентра события. Сейсмические объемные волны P и S пришли в МНУ соответственно в 07:05:48 UTC и в 07:10:01 UTC. Приход поверхностной волны зарегистрирован в 07:15:31 UTC. На том же рис. 4 приведены результаты инструментальных наблюдений за микробарическими колебаниями в приземной атмосфере по данным МНУ. Здесь следует отметить, что в данном случае отчетливо наблюдались акустические сигналы, сопутствующие P - и S -волнам, и практически отсутствует акустический сигнал, сопутствующий поверхностным волнам.

Параметры сейсмических и вызванных акустических сигналов приведены в табл. 3. Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что, как и для рассмотренного выше события 06.01.2019 г., длительности акустических сигналов существенно меньше по сравнению длительностью сейсмических сигналов.

Оценка спектральных характеристик показала, что спектры сигналов, вызванных объемными сейсмическими волнами и зарегистрированных в разных пунктах, в целом близки между собой. В качестве примера на рис. 5 приведен спектр акустического сигнала от P -волны, зарегистрированного в МНУ в период события 08.07.2019 г. Форма спектра свидетельствует о том, что вызванный объемной волной акустический сигнал представляет собой суперпозицию нескольких

Таблица 2. Параметры сейсмических и акустических сигналов землетрясения 06.01.2019 г. (по данным МНУ)

Параметры	P -волна	S -волна	R -волна
T_D , с	~ 87	~ 57	~ 170
T , с	~ 4.8	~ 1.9	~ 2.4
f_S , Гц	~ 0.35	~ 0.26	~ 0.06
f , Гц	~ 1	~ 3.8	~ 1.5

Таблица 3. Параметры сейсмических и акустических сигналов землетрясения 08.07.2019 г. (по данным МНУ)

Параметры	P -волна	S -волна	R -волна
T_D , с	~ 180	~ 250	~ 300
T , с	~ 8.2	~ 11.5	—
f_S , Гц	~ 0.22	~ 0.31	~ 0.064
f , Гц	~ 2.18	~ 2	—

сигналов, каждый из которых характеризуется своей частотой при явном доминировании сигнала с частотой ~ 0.2 Гц. Можно предполагать, что сложная структура спектра объясняется наложением на основной сигнал резонансных колебаний разного происхождения.

Акустические сигналы эпицентрального происхождения. Отдельный интерес представляют акустические (в данном случае инфразвуковые) сигналы, распространяющиеся в атмосферном волноводе и зарегистрированные на значительных расстояниях от очага землетрясения. Интерес связан с возможностью оценки энергии акустического источника и соответственно самого зем-

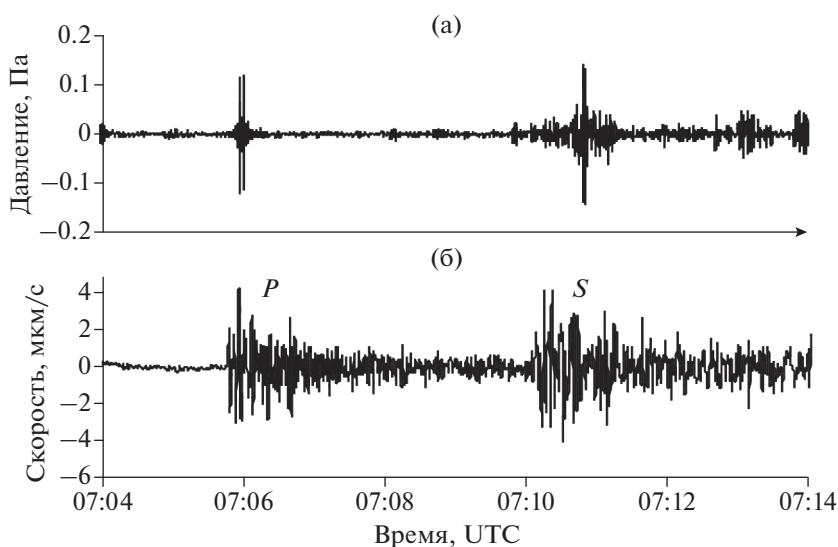


Рис. 4. Результаты регистрации микробарических вариаций (а), вызванных сейсмическим сигналом (б) от землетрясения 08.07.2019 г.

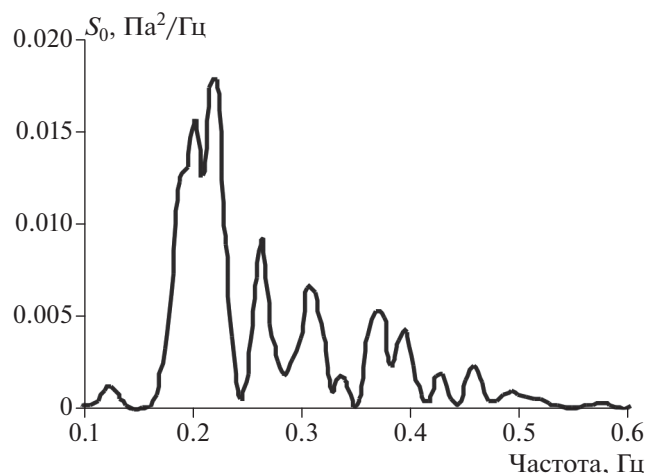


Рис. 5. Зависимость спектральной плотности от частоты акустического сигнала, сопутствующего сейсмической P -волне, вызванной землетрясением 08.07.2019 г. (по результатам регистрации в MНV).

летрясения на основе данных о характеристиках акустических сигналов [Адушкин и др., 2019; Косяков и др., 2017; Куличков и др., 2017; Мишенин и др., 2016].

Рассматриваемые сигналы эпицентрального происхождения распространяются в атмосферных волноводах со скоростями в диапазоне 285–310 м/с [Куличков, 2004]. Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что

наблюдается хорошее сходство между формами рассматриваемого сигнала, который зарегистрирован в разных пунктах. В качестве примера на рис. 6 для сравнения приведены совместно волновые формы волноводных акустических сигналов, вызванных землетрясением 08.07.2019 г. и зарегистрированных в MНV и CGM.

В данном случае пеленг источника показал, что сигналы распространялись с юго-западного направления, причем азимут, определенный по акустическим сигналам, составил ~ 160 – 164° , что с высокой точностью совпало с азимутом зарегистрированного сейсмического сигнала ($\sim 162^\circ$). Оценки, выполненные по известным координатам эпицентра очага землетрясения и пунктов регистрации, а также времени прихода сигналов в пункты регистрации, показали, что кажущаяся скорость распространения сигнала V вдоль земной поверхности с учетом нечеткости вступления акустических сигналов заключена в достаточно узком интервале 268–270 м/с. Моделирование распространения сигнала показало, что инфразвуковой сигнал распространялся по стратосферному волноводу, многократно отражаясь от его верхней границы [Адушкин и др., 2019; Куличков, 2004].

Общая длительность сигнала составляет ~ 2 мин. При этом следует отметить, что начальный участок сигнала длительностью ~ 1 мин характеризуется частотой около 0.07 Гц. Второй участок сигнала характеризуется более высокой частотой

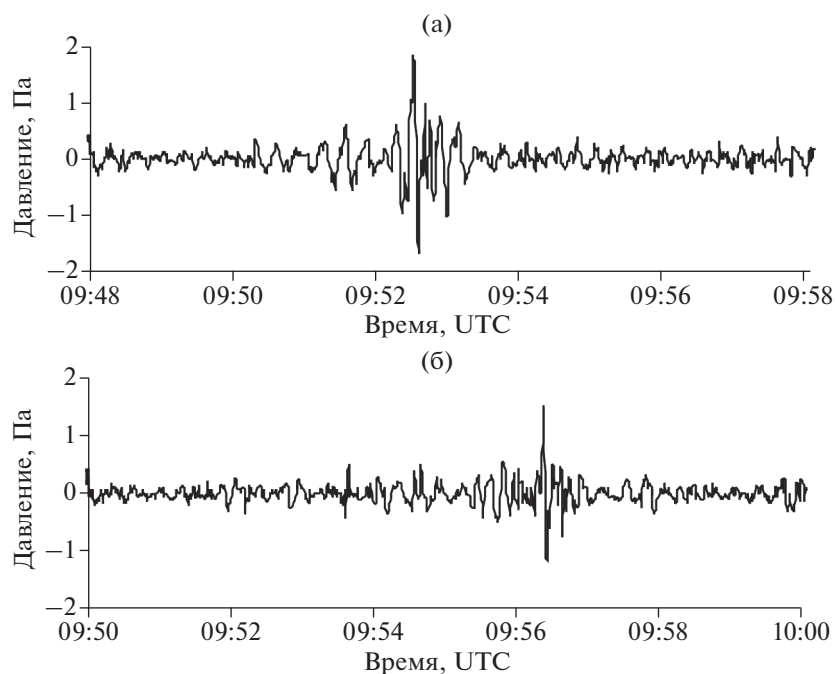


Рис. 6. Волновые формы инфразвукового сигнала в диапазоне частот 0.03–10 Гц, распространяющегося по стратосферному волноводу (результаты регистрации в MНV (а) и CGM (б) 08.07.2019 г.).

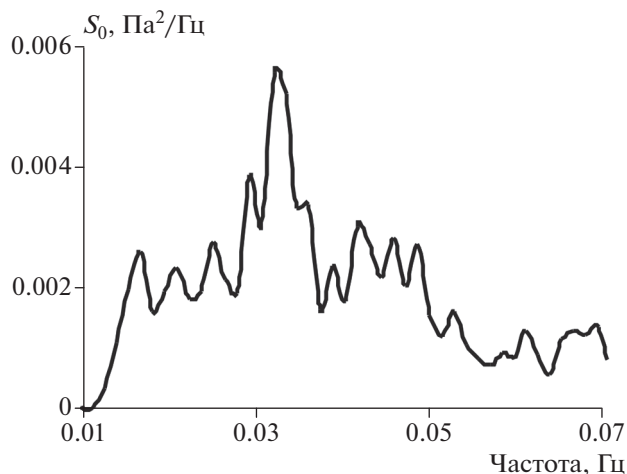


Рис. 7. Зависимость спектральной плотности от частоты сигнала, распространяющегося в стратосферном волноводе, по данным МНУ (событие 08.07.2019 г.).

~0.13 Гц. Это в полной мере соответствует разделению высокочастотной и более низкочастотной моды акустического сигнала при распространении в волноводе. Причем скорость распростране-

ния низкочастотной моды несколько превышает скорость распространения более высокочастотной моды [Gossard, Hook, 1975].

Спектр сигнала, зарегистрированного в МНУ, представлен на рис. 7. Как это следует из рис. 7, отчетливо выделяется преимущественная частота $f_0 \sim 0.032$ Гц.

Аналогично выглядят рассматриваемые акустические сигналы при других сейсмических событиях (для примера на рис. 8 представлена волновая форма и спектр инфразвукового возмущения, распространяющегося в атмосферном волноводе при землетрясении 23.02.2020 г.).

Волновая форма сигнала, так же как и в случае события 08.07.2019 г. (рис. 6), свидетельствует о приходе в точку наблюдения двух мод акустического сигнала: первоначально регистрируется более длиннопериодная составляющая сигнала с частотой ~0.044 Гц, затем составляющая с меньшим периодом (частота ~0.2 Гц). Преимущественная частота сигнала, как это следует из рис. 8б, характеризуется величиной $f_0 \sim 0.054$ Гц. Моделирование сигнала свидетельствует о его распространении в стратосферном волноводе с кажущейся скоростью ~282 м/с.

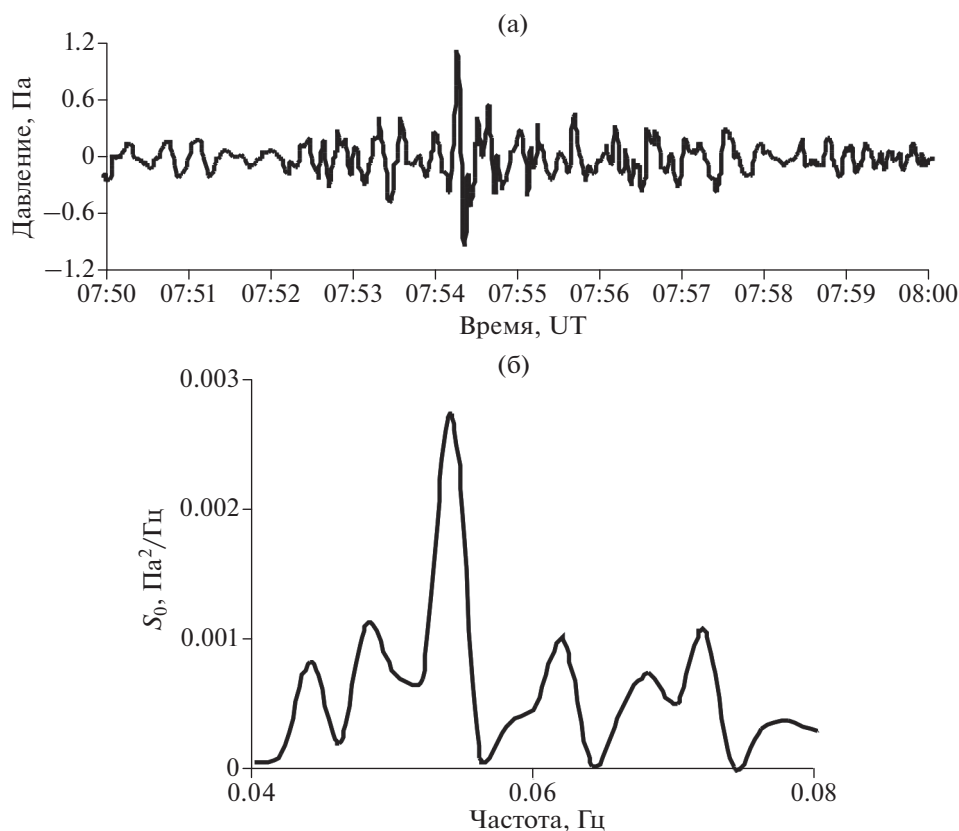


Рис. 8. Волновая форма (а) и спектр (б) инфразвукового сигнала от землетрясения 23.02.2010 г., распространяющегося в атмосферном волноводе (по данным ZVE).

Таблица 4. Результаты обработки инфразвуковых сигналов, распространяющихся в стратосферном волноводе

№ п/п	Дата	f_0 , Гц	W_S , Дж	W_A , Дж
1	26.11.2019	0.045	$2.8 \times 10^{12} - 9.5 \times 10^{13}$	8.5×10^{13}
2	24.05.2014	0.008	$1.4 \times 10^{15} - 1.6 \times 10^{17}$	3.8×10^{15}
3	20.03.2019	0.038	$2.2 \times 10^{13} - 1.1 \times 10^{15}$	1.2×10^{14}
4	24.01.2020	0.01	$\sim 10^{15} - 1.15 \times 10^{17}$	2.3×10^{15}
5	23.02.2020	0.054	$2.2 \times 10^{13} - 1.1 \times 10^{15}$	5.7×10^{13}
6	06.01.2019	0.044	$1.6 \times 10^{13} - 7.5 \times 10^{14}$	9.8×10^{13}
7	08.07.2019	0.032	$2.2 \times 10^{13} - 1.1 \times 10^{15}$	1.8×10^{14}

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты акустической регистрации, выполненной в периоды сильных сейсмических событий, свидетельствуют о наличии ярко выраженных акустических сигналов, вызванных приходом в пункты наблюдений сейсмического сигнала, а также инфразвукового сигнала, распространяющегося в стратосферном волноводе. Как было отмечено выше инфразвуковая волна, распространяющаяся в стратосферном волноводе, содержит информацию о величине энерговыделения в источнике. Действительно, имеющиеся данные [Адушкин и др., 2019] свидетельствуют о том, что в качестве основного параметра акустического сигнала при оценках полной энергии источника на основе акустических данных W_A следует рассматривать его характерную частоту f_0 , поскольку часто используемые для этих целей амплитуда сигнала и его длительность либо импульс [Косяков и др., 2017; Куличков и др., 2017; Мишин и др., 2016] существенно зависят от расстояния до источника и, главное, условий на трассе распространения. В настоящей работе для оценки W_A была использована зависимость, предложенная в работе [Адушкин и др., 2019]:

$$W_A \approx \frac{9.24 \times 10^{10}}{f_0^{2.2}} \text{ Дж}, \quad (1)$$

где f_0 измеряется в Гц.

Результаты оценок по зависимости (1), полученные с привлечением данных о преимущественных частотах инфразвуковых сигналов, вызванных разными землетрясениями из табл. 1, приведены в табл. 4. Там же для сравнения приведены энергетические характеристики рассмотренных сейсмических событий W_S , полученные с использованием магнитуд. Величина W_S оценивалась с использованием эмпирической зависимости, полученной на основе обобщения данных работ [Буллен, 1966; Коган, 1974; Левин и др., 2010]:

$$\text{Lg} W_S = (1.5 - 1.8)M + 11.8,$$

где W_S выражена в эрг; M – магнитуда землетрясения.

Из табл. 4 следует, что результаты оценок, выполненных с использованием акустических данных, совпадают с оценками по магнитуде сейсмического события.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные данные, полученные в результате инструментальных наблюдений, свидетельствуют о том, что землетрясения с магнитудами 5.1–6.9 вызывают в нижней атмосфере акустические возмущения двух типов. Атмосферные возмущения от землетрясений состоят из акустических колебаний, вызванных приходом сейсмических волн в точку регистрации (первый тип), а также инфразвуковой волны, распространяющейся в стратосферном волноводе, источником которой являются вертикальные движения земной поверхности в эпицентральной зоне землетрясения в период основного толчка (второй тип). Амплитуды, длительности и спектральные характеристики акустических сигналов, генерируемых землетрясением, позволяют проводить уверенную их регистрацию имеющимися измерительными средствами на расстояниях, превышающих 2700 км от эпицентральной зоны сейсмического события.

Величина энергии землетрясения, оцененная с использованием спектральных характеристик инфразвукового сигнала, распространяющегося в стратосферном волноводе, W_A , хорошо согласуется со значением W_S , определенным по магнитуде землетрясения.

Процессы генерации акустических возмущений при землетрясениях не изучены в такой мере, чтобы разрабатывать адекватную модель процесса передачи энергии землетрясений в атмосферу. По этой причине приведенные в настоящей работе данные можно рассматривать в качестве дополнительной информации, полезной при уточнении возможных механизмов сильных землетрясений, а также основы для разработки

подходов и конкретных механизмов взаимодействия в системе литосфера—атмосфера.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены по государственному заданию (тема АААА-А-19_119021890067-0).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят И.А. Санину за представленные сейсмические данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю.* “Михнево”: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // *Физика Земли*. 2016. № 1. С. 108–120.
- Адушкин В.В., Нифадьев В.И., Чен Б.Б., Попель СИ., Когай Г.А., Дубинский А.Ю., Вайдлер П.Г.* Об изменениях параметров внутренних гравитационных волн в атмосфере Центральной Азии перед землетрясением // *Докл. РАН*. 2019. Т. 487. № 3. С. 299–303.
- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А., Харламов В.А.* О связи параметров инфразвуковых волн с энергией источника // *Физика Земли*. 2019. № 6. С. 96–106.
- Булен К.Е.* Введение в теоретическую сейсмологию. М.: Мир. 1966. 460 с.
- Гармаш С.В., Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Швед Г.М.* Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // *Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1989. № 12. С. 1290–1299.
- Голицын Г.С., Кляцкин В.И.* Колебания в атмосфере, вызванные движениями земной поверхности // *Докл. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1967. Т. 3. № 10. С. 1044–1052.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 296 с.
- Гохберг М.Б., Ольшанская Е.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Ионосферный отклик на акустический сигнал от подводных землетрясений по данным GPS // *Физика Земли*. 2014. № 1. С. 3–10.
- Коган С.Я.* Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука. 1975. 152 с.
- Косяков С.И., Куличков С.Н., Мишенин А.А.* Новые способы оценки энергии импульсных источников по результатам регистрации акустических волн в атмосфере // *Изв. РАН. Сер. Физическая*. 2017. Т. 81. № 8. С. 1–7.
- Куличков С.Н., Авилов К.В., Буш Г.А. и др.* Об anomalно быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.
- Куличков С.Н., Попов О.Е., Мишенин А.А. и др.* Использование закона сохранения акустического импульса для оценки энергии наземных акустических источников дистанционным методом // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 6. С. 686–698.
- Левин Б.В., Сасорова Е.В., Борисов С.А., Борисов А.С.* Оценка параметров слабых землетрясений и их сигналов // *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 3. С. 60–70.
- Мишенин А.А., Косяков С.И., Куличков С.Н.* К вопросу об оценке параметров импульсных источников по результатам регистрации акустических волн в атмосфере // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 6. С. 681–690.
- Пасечник И.П.* Воздушные волны, возникшие при Гоби-Алтайском землетрясении 4 XII. 1957 г. // *Изв. АН СССР. Сер. Геофизическая*. 1959. № 11. С. 1687–1689.
- Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Евменов В.Ф.* Инфразвуковая система регистрации акустико-гравитационных волн. Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС. 2005. С. 29–33.
- Сорокин А.Г., Ключевский А.В.* Инфразвуковые сигналы от землетрясений 5 декабря 2014 г. в акватории озера Хубсугул (Северная Монголия) // *Докл. РАН*. 2019. Т. 484. № 5. С. 610–614.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // *Сейсмические приборы*. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.
- Черногор Л.Ф.* Геомагнитные возмущения, сопровождавшие великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2019. Т. 59. № 1. С. 69–82.
- Шалимов С.Л., Нестеров И.А., Воронцов А.М.* О возмущениях ионосферы, регистрируемых посредством GPS, после землетрясения и цунами в Тохоку 11.03.2011 // *Физика Земли*. 2017. № 2. С. 1–12.
- Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Ольшанская Е.В.* Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 180–198.
- Швед Г.М., Голицын Г.С., Ермоленко С.И., Кукушкина А.Е.* Связь длиннопериодных собственных колебаний Земли с процессами в атмосфере // *Докл. РАН*. 2018. Т. 481. № 3. С. 315–319.
- Artru J., Farges T., Lognonne Ph.* Acoustic waves generated from seismic surface waves: propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modeling // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 158. P. 1067–1077.
- Astafyeva E.I., Afraimovich E.L.* Long-distance traveling ionospheric disturbances caused by great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004 // *Earth, Planets Space*. 2006. V. 58. № 8. P. 1025–1031.
- Bedard A.J., Georges T.M.* Atmospheric infrasound // *Phys. Today*. 2000. № 3. P. 32–37.
- Benioff H., Gutenberg B.* Observations with electromagnetic microbarographs // *Nature*. 1939. V. 144. P. 478.
- Benioff H., Ewing M., Press F.* Sound waves in the atmosphere generated by a small earthquake // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1951. V. 37. P. 600–603.
- Bolt B.A.* Seismic air waves from the great 1964 Alaskan earthquake // *Nature*. 1964. V. 202. P. 1095–1096.
- Causi Y.* An automatic seismic event processing for detection and location: the PMCC method // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 1921–1924.
- Che I.-Y., Kim G., Le Pichon A.* Infrasound associated with the deep $M \sim 7.3$ northeastern China earthquake of June 28, 2002 // *Earth Planets Space*. 2013. P. 109–113.

- Cook R.K.* Infrasound radiated during the Montana earthquake of 1959 August 18 // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1971. V. 26. P. 191–198.
- Donn W.L., Posmentier E.S.* Ground-coupled air waves from the great Alaskan earthquake. *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69. P. 5357–5361.
- Douglas O.* Additional infrasonic studies of earthquakes and mining blasts discrimination // 27th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. 2005. V. 2. P. 845–854.
- Gossard E.A., Hook W.H.* Waves in the atmosphere. Amsterdam; Oxford; N.Y.: Elsevier Sci. Publ. Comp. 1975. 456 p.
- Jones R.M., Ostrovsky L.A., Bedart A.J.* Ionospheric effects of magneto-acoustic-gravity waves: dispersion relation // *J. Atmosph. And Solar-Terrestrial Physics.* 2017. V. 159. P. 7–22.
- Kim T.S., Hayward C., Stump B.* Local infrasound signals from the Tokashi-Oki earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L20605.
- Le Pichon A., Guilbert J., Valee M., Dessa J.X., Ulziibat M.* Infrasonic imaging of the Kunlun Mountains for the great 2001 China earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. P. 1814.
- Le Pichon A., Guilbert J., Vega A., Garces M., Brachet N.* Ground-coupled air waves and diffracted infrasound from the Arequipa earthquake of June 23, 2001 // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1826.
- Le Pichon A., Blanc E., Hanchecore A.* Infrasound monitoring for atmospheric studies. Springer Dordrecht Heidelberg. London, New York. 2010. 735 p.
- Liu C.H., Klostermeyer J.* Excitation of acoustic-gravity waves in realistic thermosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1975. V. 37. № 8. P. 1099–1108.
- Mikumo T.* Atmospheric pressure waves and tectonic deformation associated with the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 2009–2025.
- Muschlecner J.P., Whitaker R.W.* Infrasound from earthquakes // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D01108.
- Sun Y.-Y., Liu J.-Y., Lin C.-Y., Tsai H.-F., Chang L.C., Chen C.-Y., Chen C.-H.* Ionospheric F2 region perturbed by the 25 April 2015 Nepal earthquake // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* 2016. V. 121. № 6. P. 5778–5784.
- Takanashi Y., Koyama Y., Isei T.* In situ measured infrasound at Sapporo associated with an earthquake occurring offshore in southwest Hokkaido on July 12, 1993 // *J. Acoust. Soc. Japan.* 1994. V. 15. P. 409 – 411.
- Watada S., Kunugi T., Hirata K. et al.* Atmospheric pressure change associated with the 2003 Tokashi-Oki earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. GL0279067.
- Yong J.M., Green G.E.* Anomalous infrasound generated by the Alaskan earthquake of 28 March 1964 // *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. P. 334–339.

Acoustic Effects of the Strong Earthquakes

A. A. Spivak^{a,*} and Yu. S. Rybnov^a

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: aaspivak100@gmail.com*

The results of instrumental observations of the acoustic effects from a number of the strong earthquakes with magnitudes ranging from 5.1 to 6.9 that occurred in Albania, Greece, Iran, and Turkey are presented. The observations were carried out at three sites—at the Geophysical observatory “Mikhnevo” (54.94° N; 37.73° E), at the Center for Geophysical Monitoring in Moscow (CGM) (55.71° N; 37.57° E) of the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, and at the site located in Zvenigorod, Moscow region (55.69° N; 36.77° E), which provided bearings to the sources of acoustic perturbations. It is shown that the earthquakes with the sources located at distances from ~1845 to ~2815 km from the recording points cause perturbations in the atmosphere in the form of acoustic oscillations of infrasonic frequency range propagating in the stratospheric waveguide and in the form of acoustic oscillations caused by seismic waves. The characteristic periods of the acoustic signals caused by the earthquakes are presented. Based on the spectral characteristics of the infrasonic signals propagating in the stratospheric waveguide, the energies of the acoustic source and the earthquake are estimated.

Keywords: earthquake, atmosphere, atmospheric pressure, variations, acoustic oscillations