



Казахский Национальный Исследовательский Технический  
Университет,  
Институт Геологии и Нефтегазового Дела  
Кафедра “Геофизики”

# Сейсмогеофизические предвестники и стратегия прогнозирования землетрясений

## Лекция 13

**Акустические предвестники. Исследования акустических  
эффектов, возникающих при сильных землетрясениях**

По материалам: А.А.Костылева (2023), А. А. Спивака, Ю. С.  
Рыбнова (2021)

**Преподаватель: Абетов Ауэз Егембердыевич – профессор,  
доктор геол.-мин. наук, академик НАН РК**

# Актуальность исследований акустических предвестников

Существуют методы долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогноза. Долгосрочный прогноз землетрясений основан прежде всего на проведении общего сейсмического районирования, осуществляемого по совокупности критериев и признаков: плотности землетрясений, их энергии и интенсивности, геологических и геофизических признаков, графиков повторяемости, максимальных значений магнитуд и других данным.

Из трёх временных масштабов прогноза (долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный) краткосрочный выделяется конкретностью времени показания. Правильно полученный прогноз даёт возможность значительно снизить риски и количество пострадавших от землетрясений.

Работа большинства систем раннего предупреждения основана на следующих принципах.

Землетрясения представляют собой ограниченные во времени колебания, которые распространяются из места возникновения по всем направлениям. Различают первичные и вторичные сейсмические волны.

Первичная волна землетрясения неопасна, однако, она не воспринимается людьми и распространяется из места своего возникновения (эпицентра) быстрее, чем разрушительные вторичные волны. Вторичная волна доходит с некоторой задержкой. Этот временной лаг представляет собой имеющееся время для оповещения людей.

Между первичной и вторичной волнами землетрясения имеются определённые физические зависимости. Характеристика любой первичной волны позволяет сделать вывод о силе будущей вторичной волны и, значит, её предполагаемом разрушительном действии. Таким образом, важнейшей задачей систем раннего предупреждения о землетрясении является способность обнаруживать первичные и вторичные волны землетрясений и анализировать их данные.

Все выше сказанное предопределяет актуальность дальнейших исследований по усовершенствованию существующих методов, а также по поиску новых нетрадиционных способов выявления предвестников землетрясений.

Известно, что одним из важных проявлений сильных землетрясений являются акустические возмущения в приземной атмосфере. Возмущения связаны с сопутствующими сейсмическим событиям вертикальными

# Актуальность исследований акустических предвестников

смещениями земной поверхности. В ряду других природных и техногенных явлений землетрясения следует рассматривать в качестве одного из заметных источников акустических, в частности, инфразвуковых колебаний в атмосфере.

Повышенный интерес к изучению акустических возмущений, вызванных землетрясениями, появился после анализа последствий Аляскинского землетрясения 27.03.1964 г. с магнитудой 9 баллов. Результаты наблюдений показали, что землетрясение сопровождалось хорошо выраженными инфразвуковыми колебаниями.

Известны и другие исследования, в которых рассматривались акустические эффекты сильных землетрясений во взаимосвязи с аномальными возмущениями естественного электромагнитного поля, атмосферного электрического поля, концентрации приземного озона и иных параметров, изменение которых может быть предвестником землетрясений.

Представленные данные, полученные в результате инструментальных наблюдений, свидетельствуют о том, что землетрясения с магнитудами 5 – 7 баллов вызывают в нижней атмосфере акустические возмущения двух типов. 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.

Частотный диапазон регистрируемых при землетрясениях акустических колебаний заключён в диапазоне частот 0.005–10 Гц, их амплитуда изменяется от 0.1 до нескольких Па. 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.

Также было отмечено, что инфразвуковая волна, распространяющаяся в стратосферном волноводе, содержит информацию о величине энерговыделения в источнике. Процессы генерации акустических возмущений при землетрясениях пока не изучены в такой мере, чтобы разрабатывать адекватную модель процесса передачи энергии землетрясений в атмосферу.

# Актуальность исследований акустических предвестников

По этой причине приведённые 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.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных проявлений сильных землетрясений являются акустические возмущения в приземной атмосфере, связанные с сопутствующими сейсмическим событиям вертикальными смещениями земной поверхности. В ряду других природных и техногенных явлений землетрясения следует рассматривать в качестве одного из заметных источников акустических, в частности, инфразвуковых колебаний в атмосфере.

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 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

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.

Считается, что инфразвуковые колебания возникают в основном при мелкофокусных землетрясениях. Однако имеющиеся данные свидетельствуют о том, что инфразвуковые колебания в атмосфере могут вызываться также глубокофокусными мантийными землетрясениями.

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 104 км и более.

# Введение

№ 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

**Таблица 1.** Перечень рассмотренных событий

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.

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, воздействие землетрясений на верхние геосферы, в частности ионосферу, осуществляется посредством акустико-гравитационных волн. Акустические колебания, в частности акустико-гравитационные волны, возбуждаемые землетрясениями, являются основным фактором, определяющим перенос энергии на ионосферные высоты.

# Введение

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 Перечень рассмотренных землетрясений приведен в табл. 1.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При выполнении исследований использовались результаты акустических наблюдений, выполняемых постоянно в Геофизической обсерватории “Михнево” (МНУ) ИДГ РАН, Центре геофизического мониторинга (СГМ) г. Москвы, а также в пункте, расположенном в г. Звенигород Московской области (ZVE).

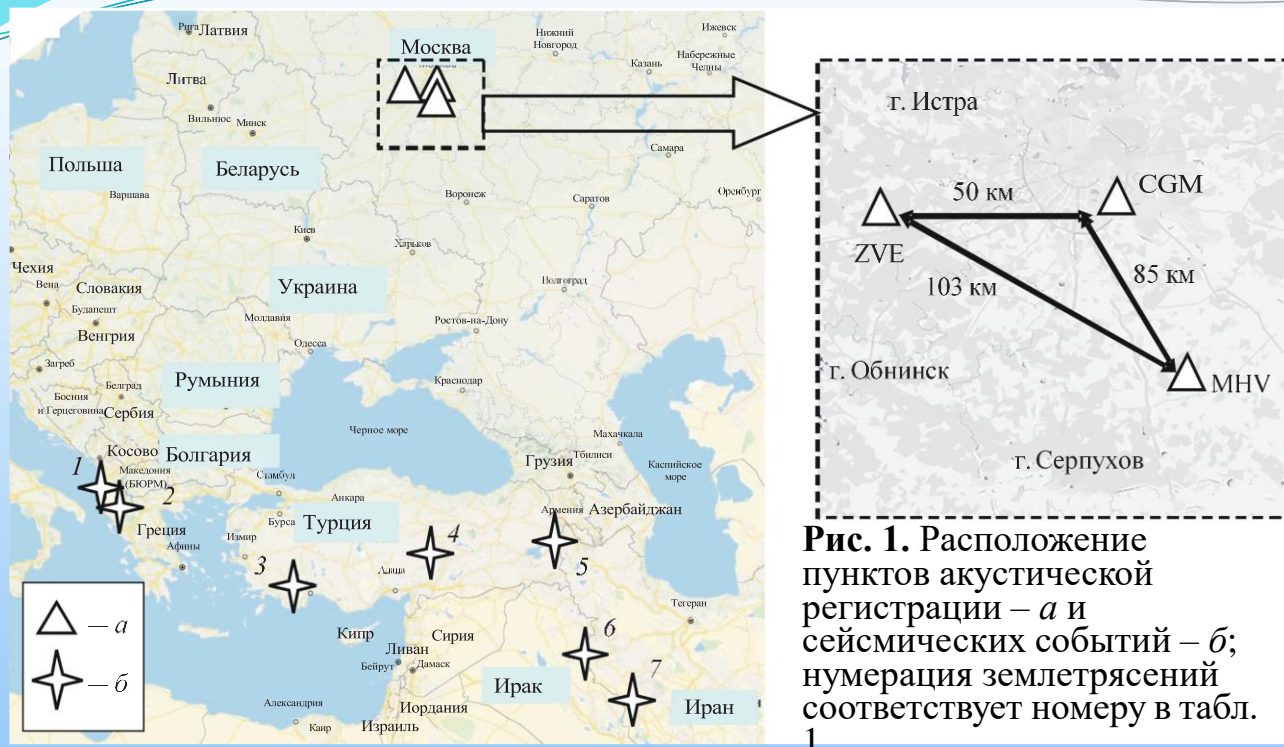
Расположение пунктов регистрации и очагов землетрясений приведено на рис. 1. Пункты располагались в вершинах треугольника со сторонами 50, 85 и 103 км.

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/](http://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.



# ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ



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.

# ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

## 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.

**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

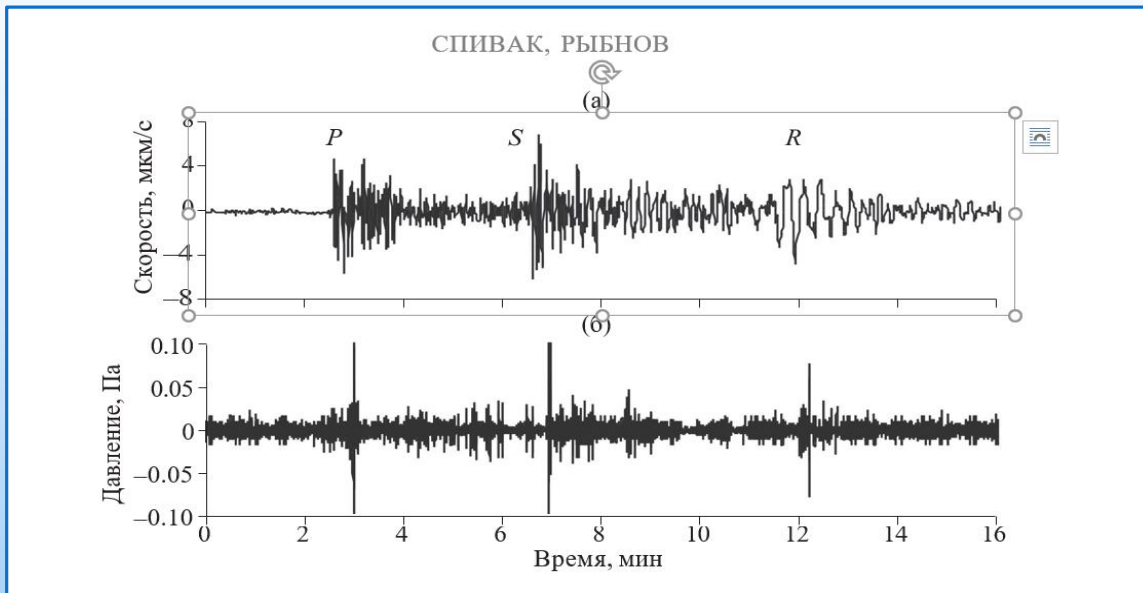
На рис. 2 приведены формы сейсмического и акустического сигналов, зарегистрированных в МНУ на расстоянии ~2411 км от эпицентра события. Объемные сейсмические волны  $P$  и  $S$  пришли в МНУ соответственно в 13:46:45 UTC и в 13:50:36 UTC. Приход сейсмической поверхностной  $Lg$ -волны зарегистрирован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

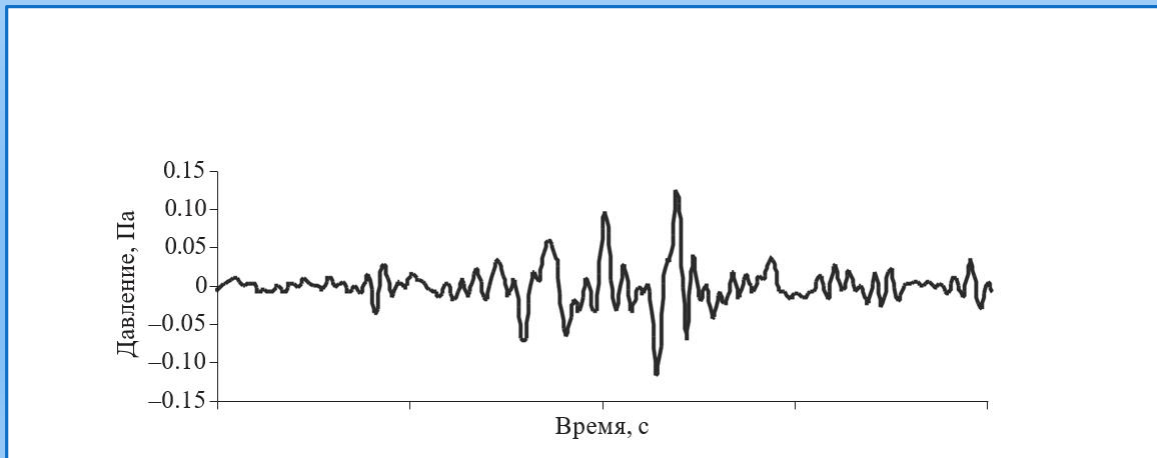
Акустические сигналы, вызванные объемными сейсмическими волнами  $P$ ,  $S$  и поверхностными волнами  $R$ , имеют форму цуга, состоящего из нескольких периодов с нарастающей и затем убывающей



# Результаты инструментальных наблюдений



**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 Р-волной.

# Результаты инструментальных наблюдений

амплитудой и короткой длительностью соответственно  $\sim 5$ ,  $\sim 2$  и  $\sim 1.5$  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 МНВ.

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

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

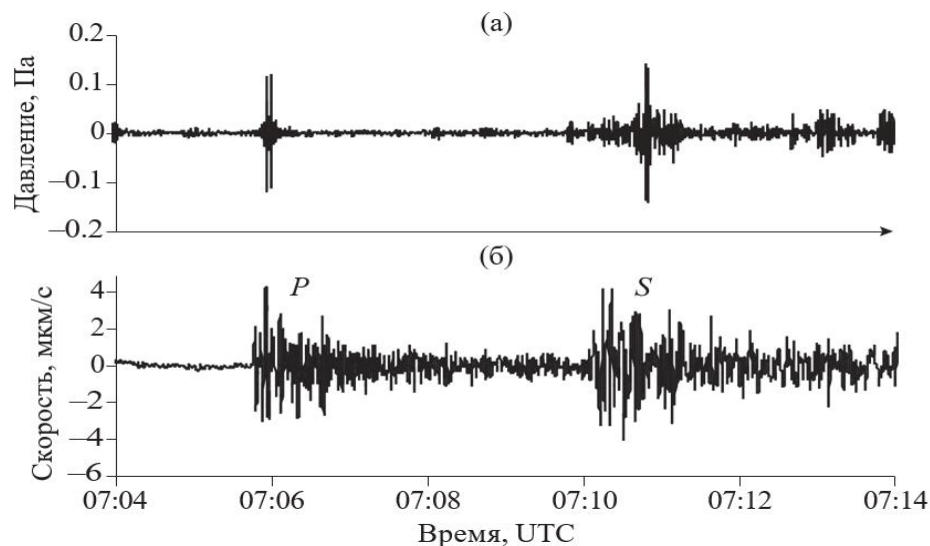


Рис. 4. Результаты регистрации микробарических вариаций (а), вызванных сейсмическим сигналом (б) от землетрясения 08.07.2019 г.

# Результаты инструментальных наблюдений

Землетрясение 08.07.2019 г. с магнитудой  $M_w = 5.6$  произошло на западе Иране в 07:00:32 UTC на глубине ~10 км.

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.

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	—

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

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

# Результаты инструментальных наблюдений

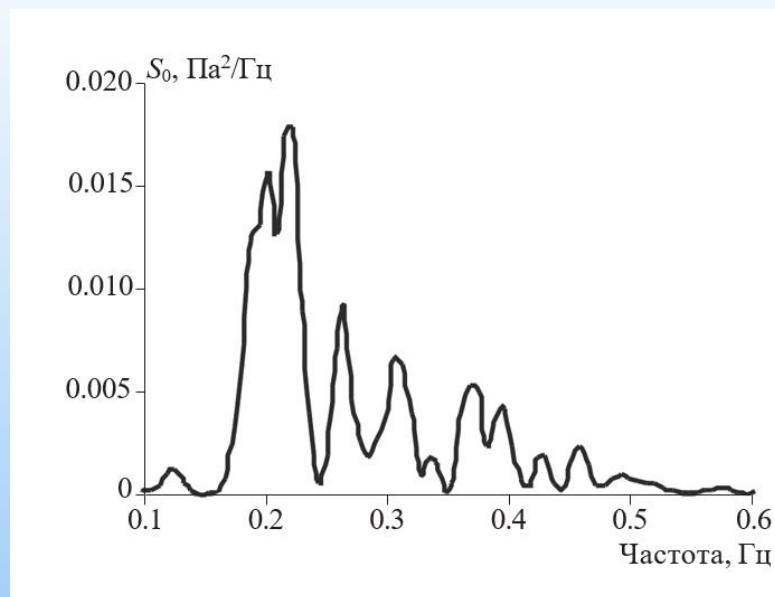


Рис. 5. Зависимость спектральной плотности от частоты акустического сигнала, сопутствующего сейсмической Р-волне, вызванной землетрясением 08.07.2019 г. (по результатам регистрации в МНУ).

сигналов, каждый из которых характеризуется своей частотой при явном доминировании сигнала с частотой  $\sim 0.2$  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 землетрясения на основе данных о характеристиках акустических сигналов

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

# Результаты инструментальных наблюдений

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 MNV и CGM.

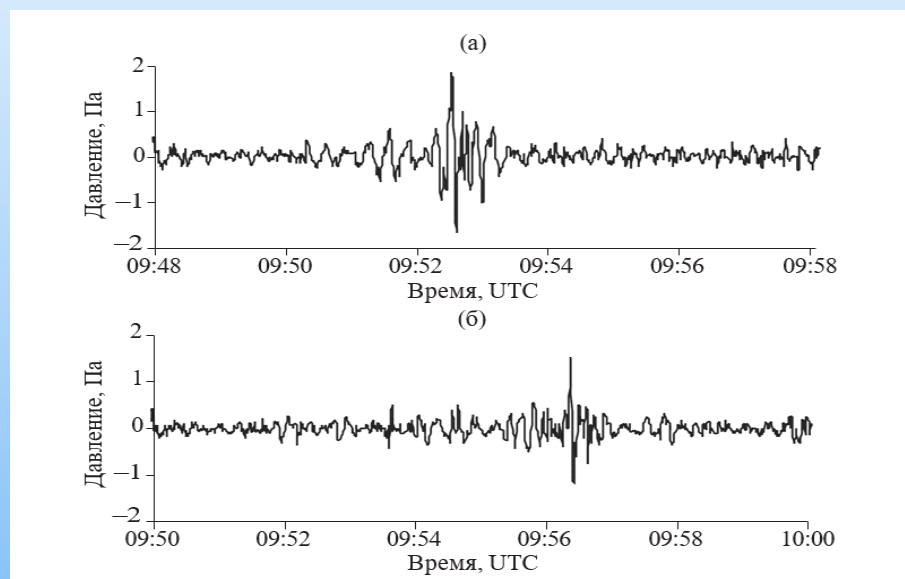


Рис. 6. Волновые формы инфразвукового сигнала в диапазоне частот 0.03–10 Гц, распространяющегося по страто- сферному волноводу (результаты регистрации в MNV (а) и CGM (б) 08.07.2019 г.).

В данном случае пеленг источника показал, что сигналы распространялись с юго-западного направления, причем азимут, определенный по акустическим сигналам, составил  $\sim 160\text{--}164^\circ$ , что с высокой точностью совпало с азимутом зарегистрированного сейсмического сигнала ( $\sim 162^\circ$ ).

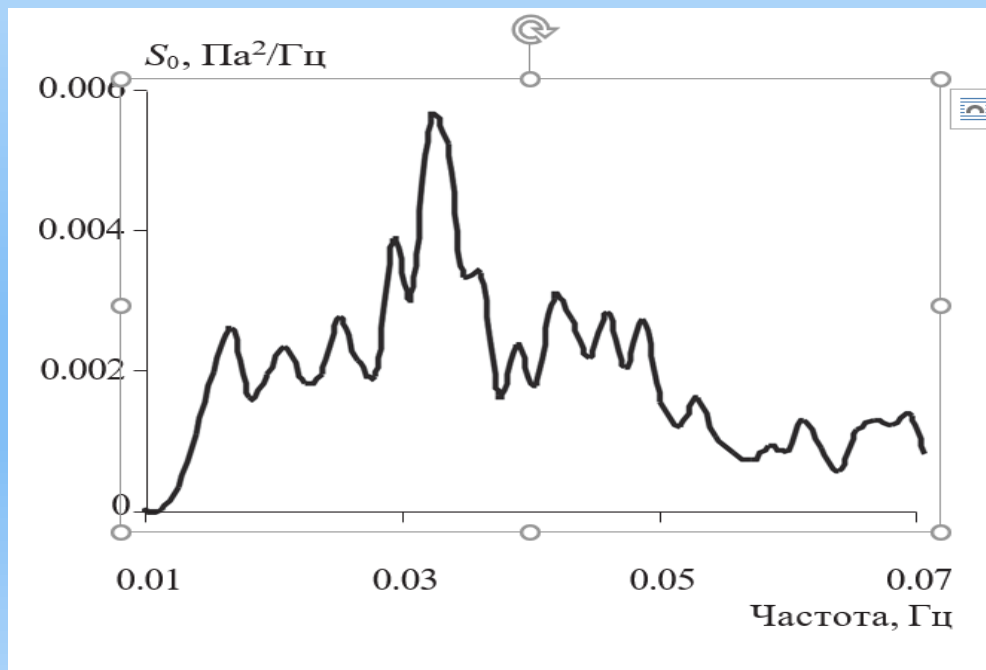
Оценки, выполненные по известным координатам эпицентра очага землетрясения и пунктов регистрации, а также времени прихода сигналов в пункты регистрации, показали, что кажущаяся скорость распространения сигнала  $V$  вдоль земной поверхности с учетом нечеткости вступления акустических сигналов заключена в достаточно узком интервале 268–270 м/с.

# Результаты инструментальных наблюдений

Моделирование распространения сигнала показало, что инфразвуковой сигнал распространялся по стратосферному волноводу, многократно отражаясь от его верхней границы

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

Причем скорость распространения низкочастотной моды несколько превышает скорость распространения более высокочастотной моды.



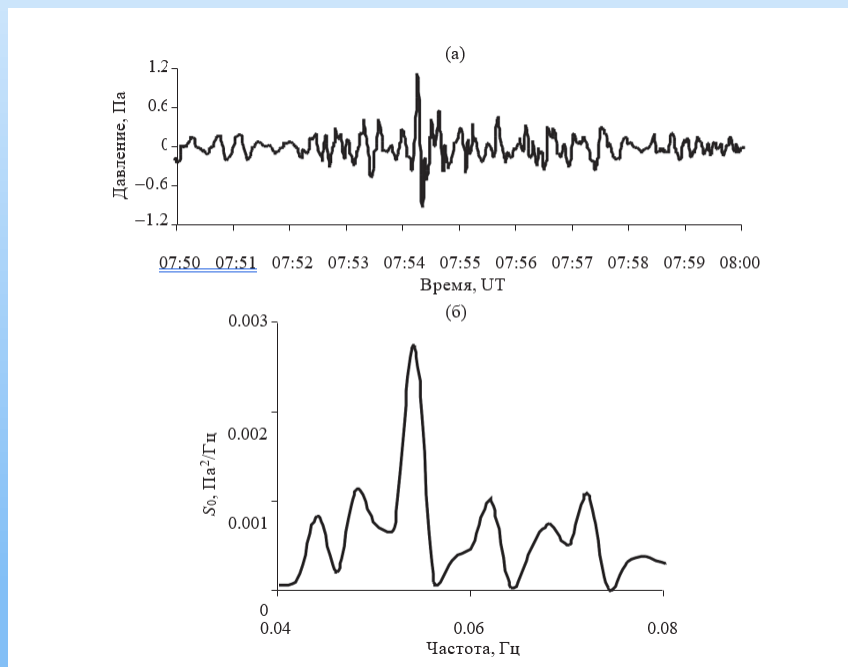
**Рис. 7.** Зависимость спектральной плотности от частоты сигнала, распространяющегося в стратосферном волноводу, по данным MНV (событие 08.07.2019 г.).



# Результаты инструментальных наблюдений

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.).



**Рис. 8.** Волновая форма (а) и спектр (б) инфразвукового сигнала от землетрясения 23.02.2020 г., распространяющегося в атмосферном волноводе (по данным ZVE).

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  $\sim 0.044$  Гц, затем составляющая с меньшим периодом (частота  $\sim 0.2$  Гц). Преимущественная частота сигнала, как это следует из рис. 8б, характеризуется величиной  $f_0 \sim 0.054$  Гц.

# Результаты инструментальных наблюдений

Моделирование сигнала свидетельствует о его распространении в стратосферном волноводе с кажущейся скоростью  $\sim 282$  м/с.

## 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 энергосвечения в источнике.

Имеющиеся данные 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 существенно зависят от расстояния до источника и, главное, условий на трассе распространения. 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.

# Обсуждение результатов

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	$2.8 \times 10^{12} - 9.5 \times 10^{13}$	$8.5 \times 10^{13}$
2	24.05.2014	0.008	$1.4 \times 10^{15} - 1.6 \times 10^{17}$	$3.8 \times 10^{15}$
3	20.03.2019	0.038	$2.2 \times 10^{13} - 1.1 \times 10^{15}$	$1.2 \times 10^{14}$
4	24.01.2020	0.01	$\sim 10^{15} - 1.15 \times 10^{17}$	$2.3 \times 10^{15}$
5	23.02.2020	0.054	$2.2 \times 10^{13} - 1.1 \times 10^{15}$	$5.7 \times 10^{13}$
6	06.01.2019	0.044	$1.6 \times 10^{13} - 7.5 \times 10^{14}$	$9.8 \times 10^{13}$
7	08.07.2019	0.032	$2.2 \times 10^{13} - 1.1 \times 10^{15}$	$1.8 \times 10^{14}$

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).

# Заключение

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 магниту- де 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.

# Вопросы по закреплению содержания лекции 13

- ❑ Первичные и вторичные сейсмические волны. Физические характеристики и зависимости. Частотный диапазон.
- ❑ Акустические возмущения и эффекты, оказываемые ими. Два основных источника акустических возмущений в атмосфере при землетрясениях.
- ❑ Методика и данные акустических наблюдений.
- ❑ Акустические колебания, вызванные сейсмическими волнами от землетрясения в Иране (06.01.2019 г.) с магнитудой  $M_w == 5.6$  на глубине  $\sim 5.6$  км. Результаты регистрации вертикальной компоненты движения свободной поверхности в MНV. Параметры сейсмических и акустических сигналов землетрясения.
- ❑ Акустические колебания, вызванные сейсмическими волнами от землетрясения в Иране (08.07.2019 г.) с магнитудой  $M_w == 5.6$  на глубине  $\sim 5.6$  км. Результаты регистрации вертикальной компоненты движения свободной поверхности в MНV. Параметры сейсмических и акустических сигналов землетрясения.
- ❑ Акустические (инфразвуковые) сигналы, распространяющиеся в атмосферном волноводе и зарегистрированные на значительных расстояниях от очага землетрясения. Кинематические характеристики.
- ❑ Зависимость спектральной плотности от частоты сигнала, распространяющегося в стратосферном волноводе, по данным MНV (событие 08.07.2019 г.).
- ❑ Волновая форма (а) и спектр (б) инфразвукового сигнала от землетрясения 23.02.2010 г., распространяющегося в атмосферном волноводе (по данным ZVE).

# Библиография

- 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.
- Буллен 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., Олышанская 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.
- 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 аномально 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.
- 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.
- 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.
- Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Олышанская Е.В. Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // Физика Земли. 2019. № 1. С. 180–198.



**Благодарю за внимание!**

**Thank you for your attention!**

**Назарларыңызға рахмет!**