Двадцать четвертая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА“
г. Москва, 2026 г.

Реакция температурных атмосферных слоев во время сейсмических процессов по спутниковым измерениям

Р.В. Одинцов[1], Т.В. Рублева[2], К.В. Симонов[3]

[1] *Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ, Красноярск, 660041, Россия*
E-mail: pomamow@gmail.com
[2] *Институт нефти и газа СФУ, Красноярск, 660041, Россия*
E-mail: tvrubleva@mail.ru
[3] *Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, 660036, Россия*
E-mail: simonovkv@icm.krasn.ru

Актуальность и цель исследований

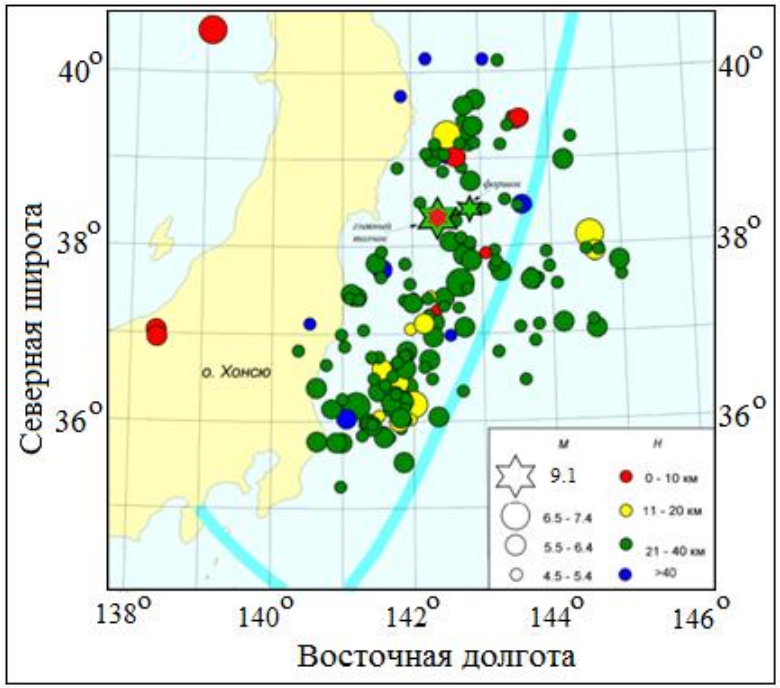
При развитии геодинамических процессов в локальных сейсмоактивных зонах изменения литосферного напряжения влияют на земную атмосферу через различные физико-химические механизмы. Впервые идею о возможной реакции атмосферы на сейсмическую активность высказал академик Б.Б. Голицын. На сегодняшний день зарегистрировано значительное количество эффектов возмущения атмосферы, связанных с геодинамическими процессами.

Однако из-за сложных процессов взаимодействия между различными атмосферными слоями изучение взаимосвязи между изменениями метеорологических параметров в возмущенной атмосфере и сейсмической активностью до сих пор остается крайне важной задачей. Исходя из этого, актуальным направлением является обнаружение реакции близлежащих к твердой Земле слоев тропосферы и стратосферы во время проявлений сейсмичности по спутниковым данным.

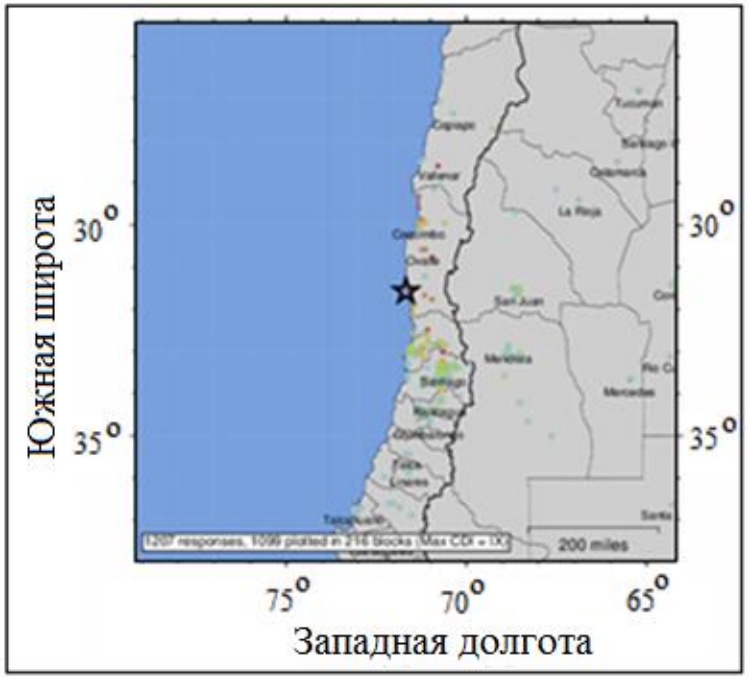
Целью данной работы является выявление вариаций в тропосфере и нижней стратосфере метеорологических параметров (давления, температуры), а также малых газовых составляющих (озона), возникающих во время сейсмической активности на основе разработанной методики контроля атмосферных колебаний по данным космического мониторинга.

Сейсмоактивные районы по каталогу USGS

В качестве примеров сейсмоактивных районов представлены эпицентральные области сильных землетрясений с магнитудами M_w= 9.1 (Япония, 2011 г.) и M_w=8.3 (Чили, 2015 г.).

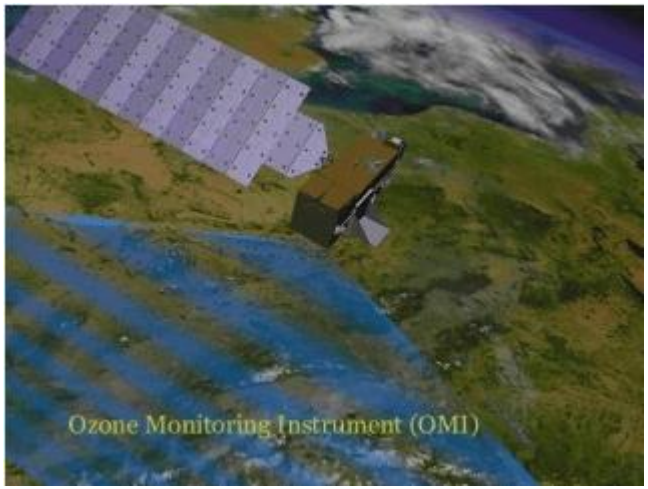


Карта эпицентральной области Японского землетрясения, произошедшего в 14 час. 46 мин. по местному времени 11.03.2011 г. . Координаты эпицентра: 38,322°N и 142,369°E. Глубина гипоцентра 32 км.



Карта эпицентральной области Чилийского землетрясения, зарегистрированного в 19 час. 54 мин. по местному времени 16.09.2015 г. . Координаты эпицентра: 38,026°S и 73,005°W. Глубина гипоцентра 33 км.

Аппаратура OMI, ATOVS и ATMS, установленная на космических аппаратах (КА)



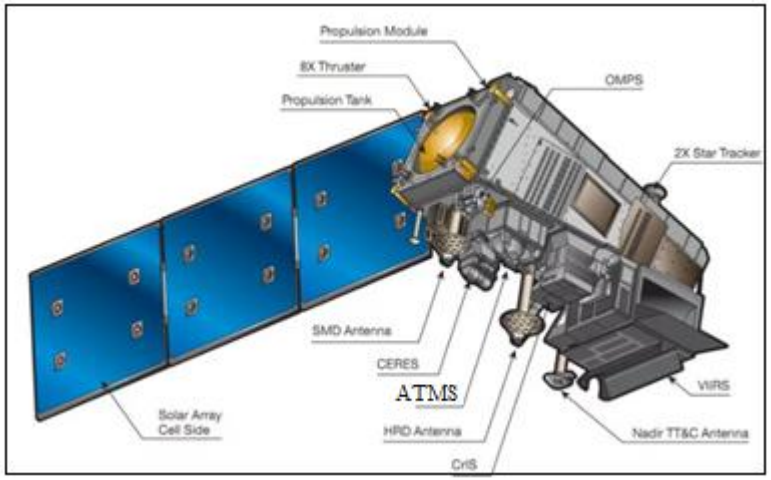
Спутниковые измерения озона выполняются с помощью **спектрометра OMI (**Ozone Monitoring Instrument, **КА AURA, NASA)** в спектральном диапазоне от 264 до 504 нм с разрешением 0,45-0,63 нм. Шаг спектральной дискретизации варьируется от 0,15 до 0,32 нм. Пространственное разрешение 13×24 км. Ширина полосы обзора составляет 2600 км, что обеспечивает ежедневный глобальный охват [*https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/*].

ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder, КА NOAA серии POES, NASA). Аппаратура ATOVS измеряет в ИК и микроволновом диапазонах.



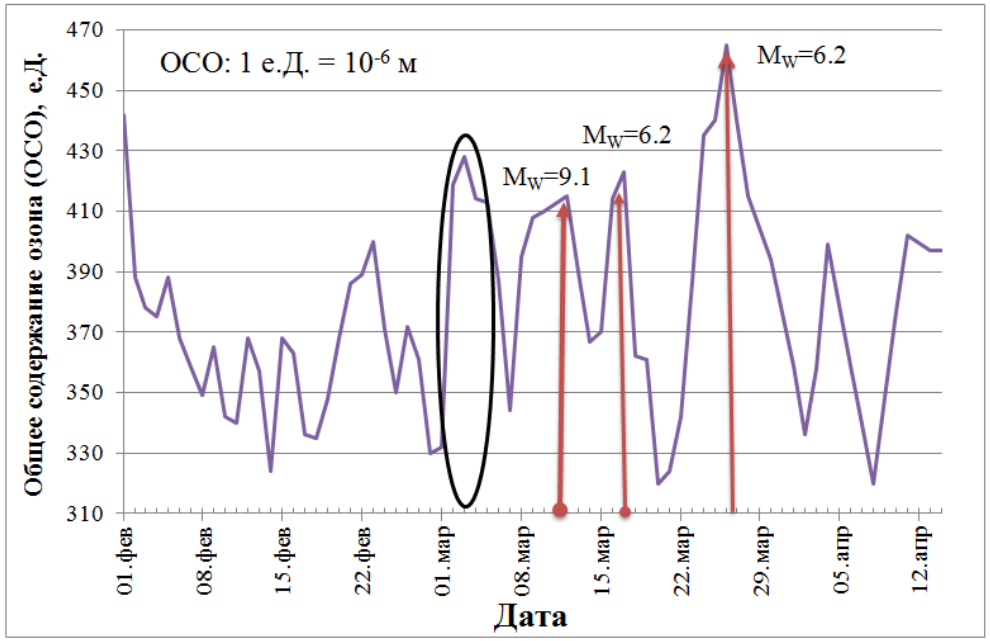
[https://www.ready.noaa.gov/index.php]

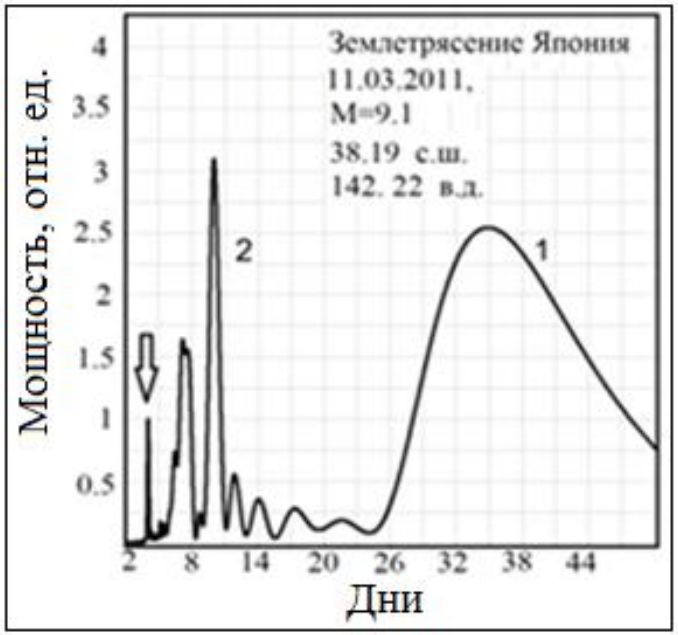
ATMS (Advanced Technology Microwave Sounders, Suomi NPP)



Радиометр ATMS поперечного сканирования регистрирует собственное микроволновое тепловое излучение атмосферы и земной поверхности в 22 спектральных каналах в диапазоне 23-183 ГГц.

Вариации озона в возмущенной нижней стратосфере относительно эпицентра Японского землетрясения M=9.1

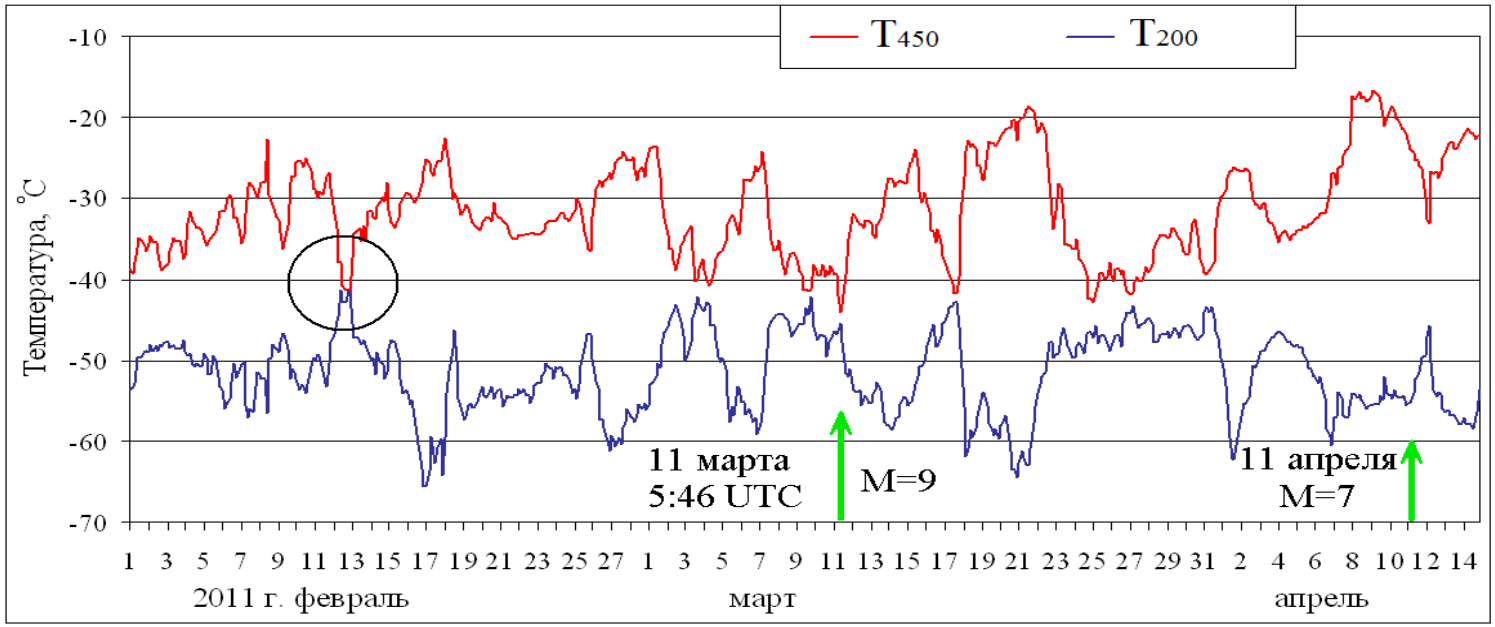




Вариации ОСО на временном интервале 1.02-14.04.2011 относительно эпицентра землетрясения M=9.1. Выявлено, что во время сейсмического «затишья» (USGS), с 1.03 по 5.03 (область выделена эллипсом), ОСО резко увеличилось на 100 е.Д. Три максимума ОСО, обозначенных красными стрелками, зарегистрированы 11.03, 17.03 и 27.03, когда относительно эпицентра землетрясения M=9.1 зафиксирована наибольшая геодинамическая активность.

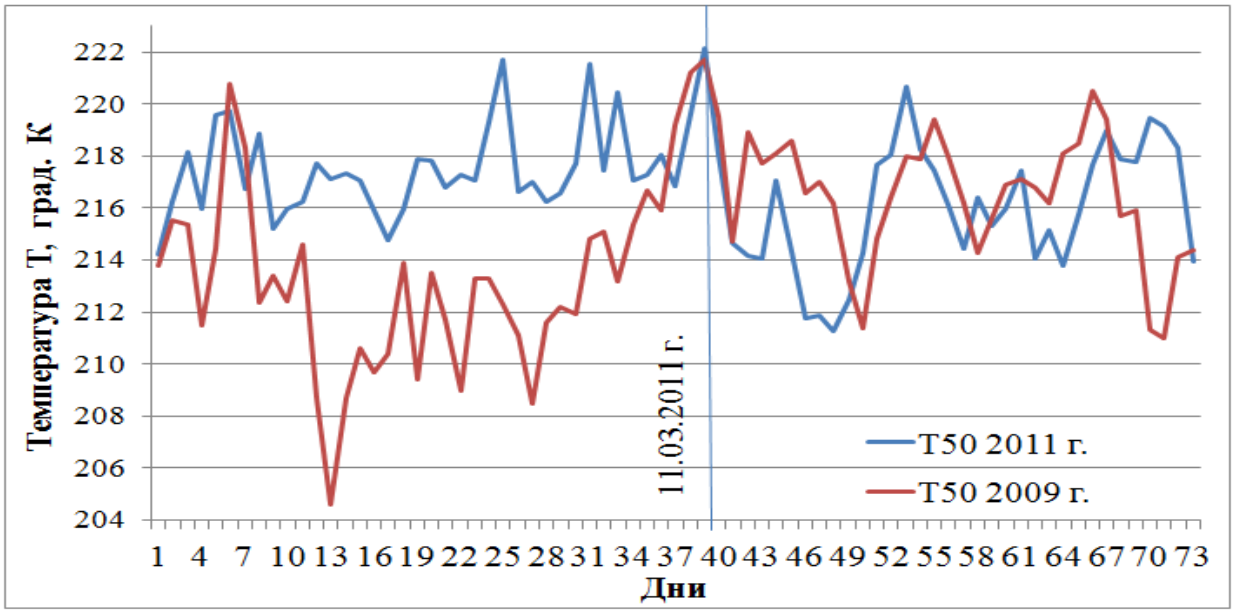
Периодограмма спектральной плотности мощности ряда ОСО для интервала 1.02-14.04.2011 г. Показывает, что максимальные значения концентрации озона наблюдаются в периоды активизации сейсмических процессов: пик *1* – при землетрясении M_w=9.1, а пик *2* – при землетрясении M_w=5.3 (15.02.2011).

Вариации температурных рядов T_{450} и T_{200} на изобарических уровнях атмосферы 450 и 200 гПа



Коэффициент корреляции между рядами температур T_{450} и T_{200} за исследуемый период составляет R=-0,76. Амплитуда колебаний температуры на каждом уровне достигает 20° С и более. Обычно в невозмущенной атмосфере уровень 450 гПа лежит в тропосфере, а уровень 200 гПа попадет в тропопаузу. Во время сейсмических событий 2011 г. на уровне 200 гПа наблюдается повышение температуры, а на изобарическом уровне 450 гПа – понижение. Если интерпретировать графики как изменения давления при различных значениях температуры, тогда уменьшение температуры характеризует увеличение давления, а увеличение температуры – уменьшение давления.

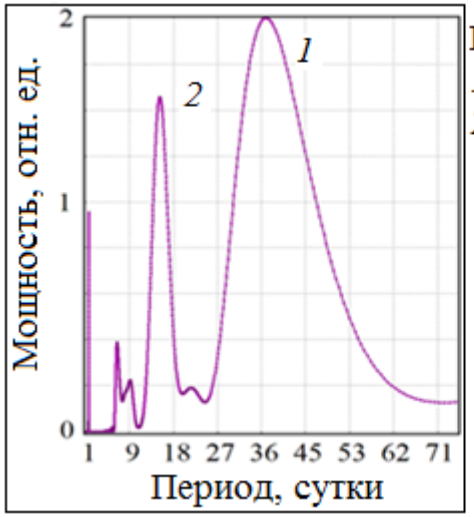
Температурные профили на изобарическом уровне 50 гПа для возмущенной и невозмущенной атмосферы относительно эпицентра Японского землетрясения 2011 г.



Индекс Т50 *иллюстрирует изменение температурного профиля на изобарическом уровне* 50 гПа с 1 февраля по 14 апреля. Чертой обозначен момент сейсмособытия.

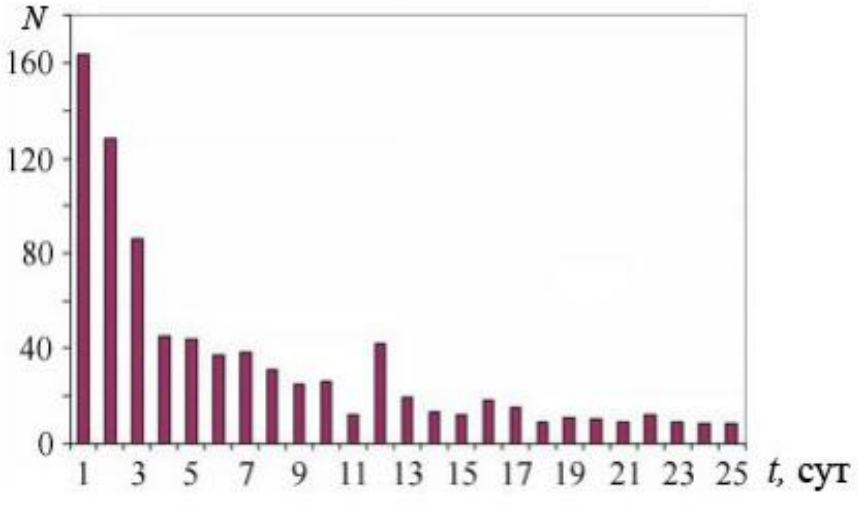
Из массива данных для исследуемого периода 2011 г. выбраны значения температуры на уровне 50 гПа (высота 20 км для слоя озона) для местного времени 15 час. Вариации ряда Т50 2011г. характеризуют колебания температуры в возмущенной атмосфере относительно эпицентра. В качестве «фонового» температурного ряда Т50 по геофизическим данным USGS выбран аналогичный временной промежуток в 2009 г. В это время в изучаемом районе сейсмическая обстановка была относительно спокойная и температурный ряд Т50 2009 г. характеризует условия невозмущенной атмосферы. Коэффициент корреляции между рядами Т50 2011 г. и Т50 2009 г. равен 0,38. Обнаружено, что наблюдался эффект понижения амплитуды температуры на уровне 50 гПа во время подготовки землетрясения.

Общий характер затухания температурного ряда и афтершоковой последовательности после главного толчка Японского землетрясения 11.03.2011 г.



Временной ряд 1.02-14.04:
1 - 11.03.2011, Mw = 9.1
2 - 15.02.2011, Mw = 5.5

Периодограмма спектральной плотности мощности ряда T50 2011 г. для эпицентральной области Японского землетрясения *Mw*=9.1. Пики атмосферных колебаний наблюдаются в даты зарегистрированных главных толчков в феврале (2) и марте (1). Обнаружены колебания с периодом *t*=38 сут. во время землетрясения *Mw*=9.1. Затухание колебаний происходило в течение 33 суток после 11 марта.

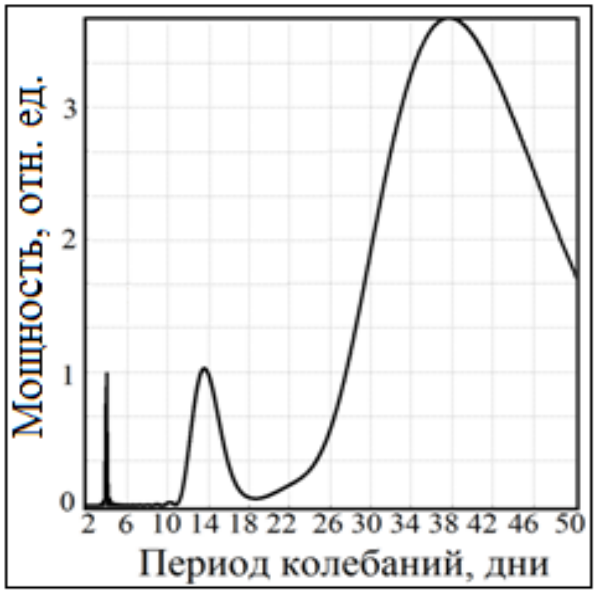


Гистограмма, характеризующая затухание афтершоковых последовательностей землетрясения Mw=9.1 в течении 25 суток после главного толчка. *N* – число афтершоков с $M \geq 4.6$ в сутки[1].

[1]*Тихонов И.Н., Ломтев В.Л. Тектонические и сейсмологические аспекты великого Японского землетрясения 11 МАРТА 2011 ГОДА // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т.2. № 2. P. 145-160.*
https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-2-0038

Вариации озона в возмущенной нижней стратосфере относительно эпицентра Чилийского землетрясения M=8.3 в 2015 г.

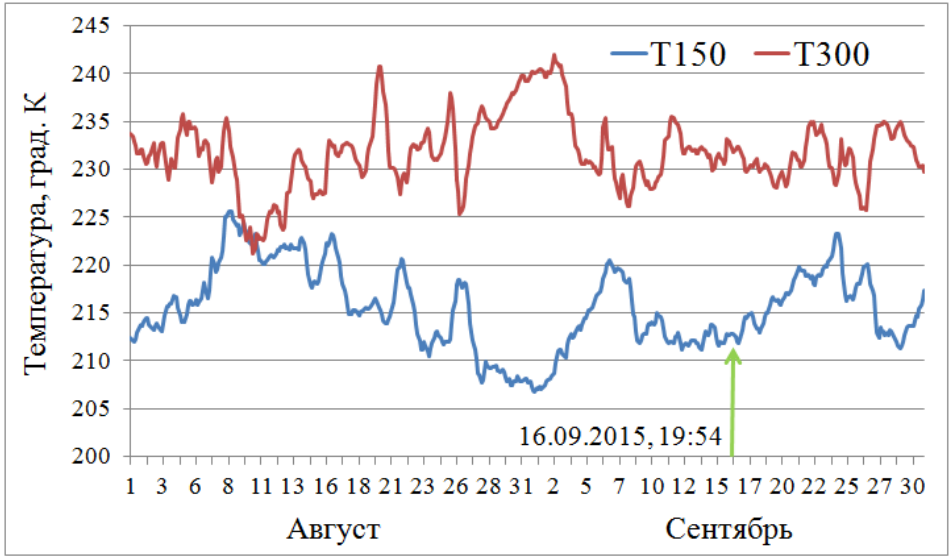




Вариации ОСО на интервале с 1.08 по 29.09.2015 г. относительно эпицентра землетрясения M=8.3. Стрелкой обозначен момент сейсмособытия с M_w = 8,3.
Обнаружены вариации общего содержания озона, вызванные сейсмической активностью, с 29.08 по 16.09.2015 в диапазоне 240-300 е.Д.

Периодограмма спектральной плотности мощности для ряда ОСО в интервале 1.08-29.09.2015 г. Максимальный пик ОСО наблюдается в сентябре, период колебаний составил 38 сут.

Вариации температурных рядов T_{150} и T_{300} на изобарических уровнях атмосферы 150 и 300 гПа для возмущенной атмосферы



Коэффициент корреляции между рядами температур T_{150} и T_{300} за исследуемый период с 1.08 по 30.09 2015 г. равен R=-0,66. Амплитуда колебаний температуры на уровнях 150 и 300 гПа достигает примерно 20° С. Во время сейсмических событий 2015 г. на уровне 150 гПа наблюдается повышение температуры, а на изобарическом уровне 300 гПа – понижение.

Периодограмма спектральной плотности мощности ряда T_{150}

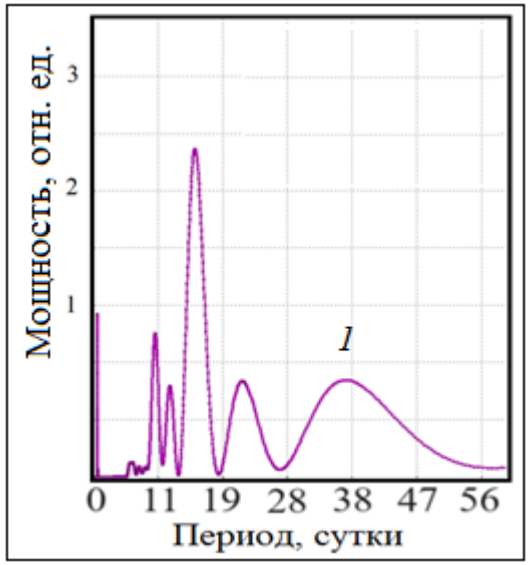


График спектральной плотности мощности ряда T_{150} относительно эпицентральной области Чилийского землетрясения M=8.3. Обнаружены колебания с периодом t=36 сут. Пик колебания *1* наблюдается в сентябре 2015 г. во время подготовки Чилийского землетрясения.

Заключение

С помощью разработанной методики контроля колебаний в невозмущенной и возмущенной атмосфере удалось выявить понижение и повышение амплитуды температуры на уровнях 150, 100, 50 и 20 гПа во время наибольшей сейсмоактивности над исследуемыми районами независимо от сезона.

Выявленные периоды флуктуаций в тропосфере и стратосфере для землетрясений: в Японии (11.03.2011, M=9.1); Чили (16.09.2015, M=8.3); Калифорнии (06.07.2019, M=7.1); на Суматре (06.04.2010, M=7.8) и в Канаде (07.08.2009, M=6.1) варьировались от 16 до 38 суток, определяя изменчивость метеопараметров (температуры, давления), а также общее содержание озона за несколько дней до и после возникновения землетрясений относительно эпицентра.

Полученные результаты важны для понимания взаимовлияния атмосферы и литосферы в сейсмоактивных районах во время геодинамической активности.