

УДК 534.23:551.594.11

АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИЕЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В АТМОСФЕРЕ У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

© 2014 г. О. П. Руленко^{1,2}, Ю. В. Марапулец², М. А. Мищенко²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: rulenko@kscnet.ru

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034 Камчатский край, с. Паратунка, e-mail: marpl@ikir.ru

Поступила в редакцию 27.03.2012 г.

С целью изучения воздействия литосферы на атмосферу у границы их соприкосновения в сейсмоактивном регионе летом—осенью 2006–2008 гг. на Камчатке в одном пункте одновременно измерялись геоакустическая эмиссия на частотах 2.0–6.5 кГц, атмосферное электрическое поле у поверхности земли и метеорологические величины. Используя непараметрические методы корреляционного анализа, исследована связь между среднечасовыми значениями всех величин. После исключения случаев плохой погоды, а также выделения слабого влияния неучтенных метеорологических и других факторов в экспериментах 2006, 2007 гг. обнаружена статистически высокозначимая обратная связь между возмущениями геоакустической эмиссии и электрического поля. Она имеет не метеорологическое происхождение. В эксперименте 2008 г. эта связь статистически незначима. Наиболее вероятной причиной обнаруженной связи является активизация деформирования приповерхностных осадочных пород в районе пункта измерений при сеймотектоническом процессе.

DOI: 10.7868/S0203030614030055

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие литосферы на атмосферу является составной частью взаимодействия твердой и газообразной геосферных оболочек. Оно определяется динамикой литосферных процессов и происходит интенсивно на границе соприкосновения геосфер, где значительны потоки в атмосферу массы и энергии. Здесь наблюдаются высококонтрастные изменения свойств контактирующих сред и взаимодействия геофизических полей разной природы. Наиболее сильно литосферно-атмосферное воздействие проявляется в сейсмоактивных регионах на заключительной стадии подготовки землетрясений [Адушкин, Спивак, 2005; Адушкин и др., 2006; Войтов, Добровольский, 1994; Гохберг, 1999; Спивак, 2006; Спивак, 2009].

Исследования на Камчатке показали, что при активизации деформирования приповерхностных осадочных пород в результате возникающих при этом микросмещений фрагментов появляются возмущения высокочастотной геоакустической эмиссии [Купцов и др., 2004; Купцов, 2005; Купцов и др., 2005, Долгих и др., 2007]. В сейсмоактивных регионах при спокойной погоде регистрируются аномальные возмущения атмосферного электрического поля у поверхности земли

[Электромагнитные предвестники..., 1982; Гохберг и др., 1988; Сидорин, 1992]. Они возникают в зоне подготовки землетрясений и связаны с деформированием приповерхностных пород [Руленко, 2000, 2003]. Общая деформационная причина появления возмущений геоакустической эмиссии и приземного электрического поля служат основанием для их совместного исследования. При этом возмущения геоакустической эмиссии рассматриваются как прямой, а электрического поля — опосредованный отклик соответственно приповерхностных пород и электрического состояния воздуха на деформации, возникающие при перестройке поля геомеханических напряжений в районе пункта измерений. Данное исследование актуально для понимания физики воздействия литосферы на атмосферу в сейсмоактивных регионах.

В августе—октябре 2005 г. в 28 км запад—юго-западнее г. Петропавловска-Камчатского в пункте “Микижа” (52.99° с.ш., 158.23° в.д.) впервые были проведены совместные измерения геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля. В отсутствие дождя и при спокойной погоде обнаружена связь между аномальными возмущениями эмиссии в килогерцовом диапазоне частот и электрического поля. Она может по-

являться в сейсмически спокойные периоды и на заключительной стадии подготовки землетрясения [Купцов и др., 2007], что свидетельствует о ее сеймотектонической природе. Измерения были продолжены летом—осенью 2006 и 2007 гг. После исключения из рассмотрения случаев дождя, сильного и умеренного ветра, низкого атмосферного давления, а также выделения слабого влияния неучтенных метеорологических и других факторов в обоих экспериментах обнаружена высокозначимая корреляционная связь между возмущениями геоакустической эмиссии и электрического поля. Наиболее вероятной причиной этой связи является усиление деформирования приповерхностных осадочных пород в районе пункта измерений при сеймотектоническом процессе, который интенсивно протекает у Восточной Камчатки [Марапулец и др., 2010]. Неустойчивость этого процесса во времени и неоднородная, иерархически блочная структура земной коры обуславливают сложное пространственно-временное деформирование пород, в том числе их локальные растяжения и сжатия, которые, по-видимому, влияют на проявление обнаруженной связи. Для выяснения стабильности ее проявления измерения в пункте “Микижа” были продолжены летом—осенью 2008 г.

В настоящей работе представлены результаты измерений и анализа проявления связи между возмущениями высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля за время наблюдений 2006–2008 гг. Использовались один и тот же измерительно-регистрирующий комплекс и одна методика анализа данных, что позволило сравнить результаты, полученные в разные годы.

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Высокочастотная геоакустическая эмиссия, атмосферное электрическое поле и метеорологические величины регистрировались 27 июня–16 октября 2006 г. (эксперимент 2006), 28 июня–24 октября 2007 г. (эксперимент 2007) и 2 июля–27 октября 2008 г. (эксперимент 2008). Измерения проводились в отсутствии промышленных помех и аэрозольного загрязнения воздуха, которое значительно влияет на электрическое поле.

В качестве датчика акустического давления использовался пьезокерамический гидрофон с диаграммой направленности 60° , установленный на дне озера Микижа и ориентированный на восток в сторону сейсмофокальной зоны Камчатки. Чувствительность гидрофона с предусилителем в килогерцовом диапазоне частот была первые сотни мВ/Па [Купцов, 2005]. Размеры озера составляют $200 \times 700 \text{ м}^2$, а его наибольшая глубина, где

находился гидрофон, равна 4 м. В результате длительных наблюдений [Купцов и др., 2004; Купцов, 2005] было установлено, что аномальные геоакустические возмущения в данном пункте проявляются наиболее сильно в диапазоне частот 2.0–6.5 кГц. Поэтому рассматривалось акустическое давление P_s , накопленное за 4 с в этом частотном диапазоне.

Градиент потенциала V атмосферного электрического поля измерялся на высоте 7 см от поверхности земли. Использовался датчик “Поле-2М” [Датчик..., 1991] с пороговой чувствительностью примерно 3 В/м и временем установления показаний на уровне 0.9 равным 1 с. Датчик находился на берегу озера в 130 м восточнее гидрофона на открытой поляне, которая является частью большого ровного поля с невысоким травостоем. Для устранения влияния роста травы на уменьшение квазипостоянной составляющей атмосферного электрического поля регулярно проводилось ее срезание в радиусе 3 м от датчика. На удалении 20 м от датчика “Поле-2М” одновременно измерялись атмосферное давление P_a , температура воздуха T , его относительная влажность F , скорость ветра U и интенсивность дождя I . Измерения P_a , T и F осуществлялись на высоте 2.5, U – 4.9, I – 4.2 м от поверхности земли. Использовалась цифровая метеостанция Conrad WS-2300. Геоакустическая эмиссия и электрическое поле измерялись один раз в 4 с, а метеорологические величины – один раз в 10 мин. С помощью цифровой системы сбора данных, созданной на базе персонального компьютера, осуществлялась непрерывная регистрация всех величин. Для устранения взаимного влияния акустических и электрических данных сигналы с гидрофона и датчика “Поле-2М” поступали на разные аналого-цифровые преобразователи (16 и 14-разрядные соответственно).

После измерений в 2006 г. гидрофон был поднят для проведения профилактических работ и установлен снова на дне озера в нескольких метрах от прежнего места. В результате уменьшился средний уровень геоакустической эмиссии, который в значительной степени обусловлен неоднородным строением придонных осадочных пород. Этим объясняются меньшие значения акустического давления в экспериментах 2007 и 2008, по сравнению с экспериментом 2006.

Характерной особенностью проявления связи между высокочастотной геоакустической эмиссией и атмосферным электрическим полем является уменьшение градиента потенциала поля вплоть до изменения знака и последующее восстановление через некоторое время примерно до прежнего уровня. Такие изменения возникают при значительных увеличениях акустического

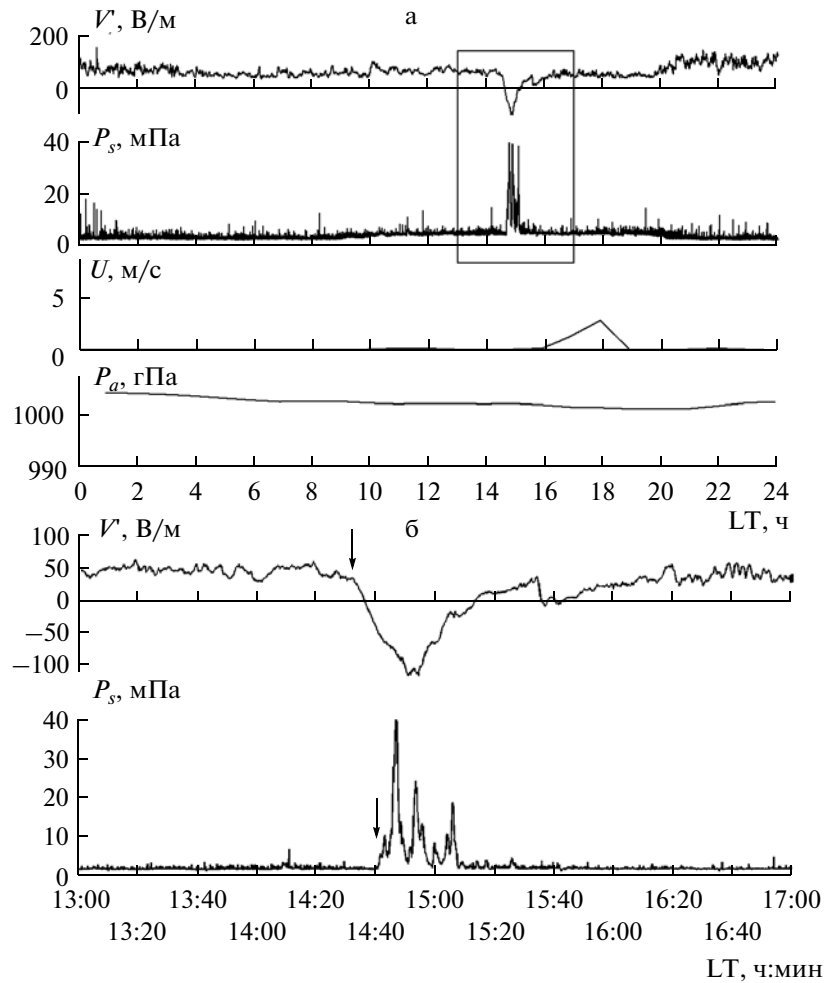


Рис. 1. Фрагмент регистрации градиента потенциала V' электрического поля, акустического давления P_s , скорости ветра U и атмосферного давления P_a 22 августа 2006 г. (а) и развертка выделенного участка регистрации (б). Стрелками отмечены моменты начала возмущений V' и P_s .

давления, которые имеют, как правило, резкое начало и длительность больше нескольких минут. Это происходит в условиях спокойной погоды, когда отсутствует дождь, сильный и умеренный ветер, слабо меняется атмосферное давление. В качестве примеров на рис. 1, 2 представлены фрагменты регистрации градиента потенциала электрического поля и акустического давления 22 августа 2006 г. и 24–25 сентября 2007 г. В обоих случаях дождя не было. При сильном увеличении P_s около 15 ч происходит уменьшение V' с изменением знака (см. рис. 1). Более слабо оно наблюдается около 4 и 6 ч (см. рис. 2), где увеличение P_s значительно меньше. Отметим, что возмущения V' и P_s около 6 ч (см. рис. 2) не связаны с увеличением скорости ветра, так как его большее усиление около 9 ч не сопровождается возмущениями этих величин.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Аномальные возмущения атмосферного электрического поля и высокочастотной геоакустической эмиссии имеют разную форму и продолжаются обычно первые десятки минут—первые часы. Они заполняют, как правило, часть часа, двух соседних часов или начального и конечного часа при длительности несколько часов. Появление возмущений такой длительности должно проявиться в изменчивости среднечасовых значений этих геофизических величин. Поэтому анализировались среднечасовые значения акустического давления \bar{P}_s и градиента потенциала \bar{V}' электрического поля, которые являются средними из 900 значений. Использование среднечасовых значений упрощает анализ большого объема данных, и, как будет показано ниже, позволяет установить наличие или отсутствие связи между высокочастотной

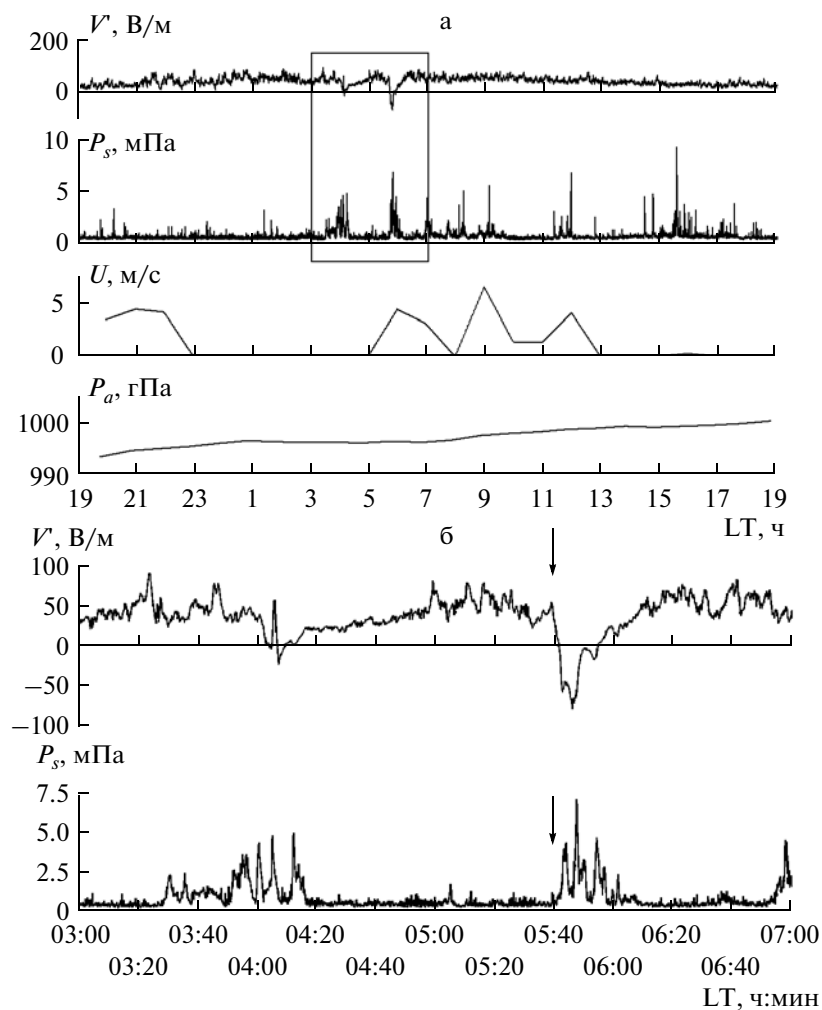


Рис. 2. Фрагмент регистрации градиента потенциала V' электрического поля, акустического давления P_s , скорости ветра U и атмосферного давления P_a 24–25 сентября 2007 г. (а) и развертка выделенного участка регистрации (б). Стрелками отмечены моменты начала возмущений V' и P_s .

стотной геоакустической эмиссией и атмосферным электрическим полем. Полученные в экспериментах ряды \bar{P}_s и \bar{V}' приведены на рис. 3, где также показаны ряды атмосферного давления \bar{P}_a .

Для выяснения влияния погоды на поведение геоакустической эмиссии и электрического поля рассматривалась корреляция между рядами \bar{P}_s , \bar{V}' и среднечасовых значений метеовеличин (\bar{P}_a , \bar{T} , \bar{F} , \bar{U} , \bar{I}), которые являются средними из 6 значений. С целью выбора адекватного метода анализа данных все ряды проверялись на нормальность распределения. Использовались оценки коэффициентов асимметрии, эксцесса и их стандартных ошибок (табл. 1), а также критерий соответствия нормальности Шапиро–Уилка, который является наиболее мощным и универсальным среди других таких критериев [Реброва, 2002]. Как видно из

табл. 1, значения коэффициентов асимметрии и эксцесса рядов \bar{P}_s , \bar{V}' , \bar{U} , \bar{I} с учетом стандартных ошибок определения существенно отличаются от нуля. Считается [Петрунин, 2008], что при значениях этих коэффициентов больше единицы имеется серьезное отклонение распределения данных от нормального. Поэтому ряды \bar{P}_s , \bar{V}' , \bar{U} , \bar{I} распределены аномально, а ряды \bar{P}_a , \bar{T} и \bar{F} имеют приблизительно нормальное распределение. Значимость W-статистики Шапиро–Уилка для всех рядов меньше 0.001 и, строго говоря, распределение среднечасовых значений всех величин не являются нормальными. В случае, когда две коррелируемые величины или одна из них имеют распределение, отличное от нормального, использование параметрического корреляционного анализа Пирсона является некорректным [Петрунин, 2008; Реброва, 2002]. Поэтому использовал-

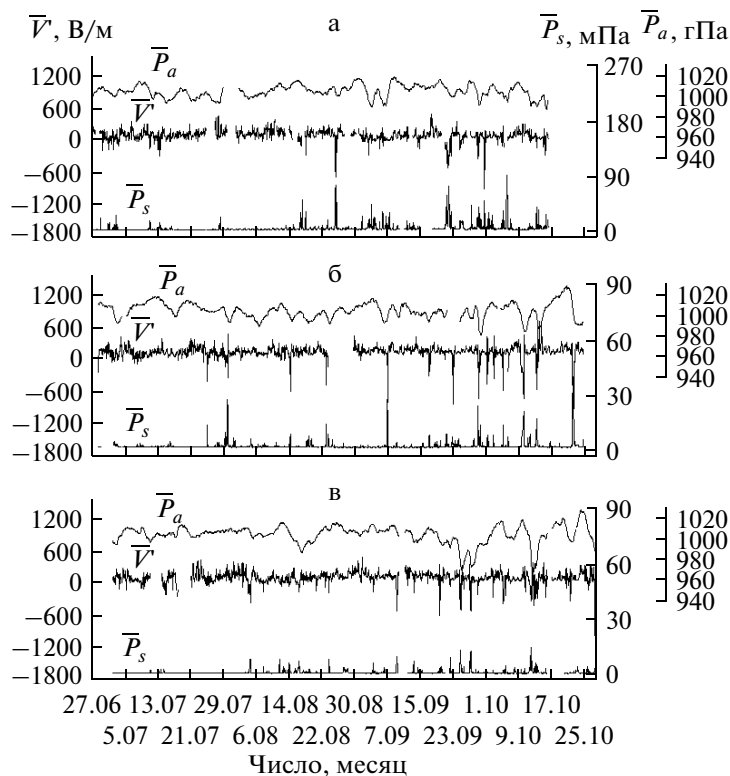


Рис. 3. Ряды среднечасовых значений градиента потенциала \bar{V} электрического поля, акустического давления \bar{P}_s и атмосферного давления \bar{P}_a в эксперименте 2006 (а), 2007 (б) и 2008 (в).

ся непараметрический корреляционный анализ Спирмена. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена r_s менее чувствителен к выбросам и погрешностям в результатах наблюдений и является более устойчивой и надежной мерой оценки свя-

зи между двумя переменными по сравнению с коэффициентом линейной корреляции Пирсона [Благовещенский, 2009; Вуколов, 2008]. Кроме того, он позволяет оценивать также монотонные нелинейные связи [Боровиков, 2003].

Таблица 1. Оценки коэффициентов асимметрии S , эксцесса K и их стандартных ошибок $\varepsilon(S)$, $\varepsilon(K)$ рядов среднечасовых значений акустического давления \bar{P}_s , электрического поля \bar{V} и метеовеличин \bar{P}_a , \bar{T} , \bar{F} , \bar{U} , \bar{I}

Ряд	Эксперимент 2006					Эксперимент 2007					Эксперимент 2008				
	n	S	$\varepsilon(S)$	K	$\varepsilon(K)$	n	S	$\varepsilon(S)$	K	$\varepsilon(K)$	n	S	$\varepsilon(S)$	K	$\varepsilon(K)$
\bar{P}_s	2548	6.28	0.05	51.57	0.10	2754	7.48	0.05	69.57	0.09	2634	5.86	0.05	44.20	0.1
\bar{V}	2312	-1.72	0.05	12.15	0.10	2682	-3.52	0.05	23.70	0.09	2621	-2.07	0.05	14.25	0.1
\bar{P}_a	2573	-0.20	0.05	-0.38	0.10	2722	-0.03	0.05	0.40	0.09	2770	-1.27	0.05	3.09	0.09
\bar{T}	2573	0.50	0.05	0.08	0.10	2722	-0.19	0.05	0.29	0.09	2770	-0.05	0.05	0.29	0.09
\bar{F}	2573	-0.65	0.05	-0.58	0.10	2722	-0.69	0.05	-0.52	0.09	2770	-1.06	0.05	0.25	0.09
\bar{U}	2573	3.41	0.05	13.05	0.10	2722	3.62	0.05	16.93	0.09	2770	4.68	0.05	26.64	0.09
\bar{I}	2573	8.61	0.05	101.7	0.10	2722	7.68	0.05	71.90	0.09	2770	6.14	0.05	47.53	0.09

Примечание. n – число среднечасовых значений.

Таблица 2. Оценки коэффициента корреляции Спирмена r_s и его уровня значимости p между рядами среднечасовых значений акустического давления \bar{P}_s , электрического поля \bar{V}' и метеовеличин $\bar{P}_a, \bar{T}, \bar{F}, \bar{U}, \bar{I}$

Ряд	\bar{P}_a			\bar{T}			\bar{F}			\bar{U}			\bar{I}		
	n	r_s	p	n	r_s	p	n	r_s	p	n	r_s	p	n	r_s	p
Эксперимент 2006															
\bar{P}_s	2464	-0.04	0.029	2464	0.06	0.005	2464	-0.16	<0.001	2464	0.19	<0.001	2464	0.34	<0.001
\bar{V}'	2273	0.12	<0.001	2273	0.10	<0.001	2273	-0.07	0.001	2273	-0.08	<0.001	2273	-0.27	<0.001
Эксперимент 2007															
\bar{P}_s	2643	-0.15	<0.001	2643	0.13	<0.001	2643	-0.04	0.035	2643	0.22	<0.001	2643	0.31	<0.001
\bar{V}'	2569	0.15	<0.001	2569	-0.15	<0.001	2569	-0.08	<0.001	2569	-0.11	<0.001	2569	-0.28	<0.001
Эксперимент 2008															
\bar{P}_s	2634	-0.15	<0.001	2634	0.19	<0.001	2634	-0.02	0.26	2634	0.22	<0.001	2634	0.47	<0.001
\bar{V}'	2620	0.17	<0.001	2620	0.07	<0.001	2620	-0.16	<0.001	2620	-0.11	<0.001	2620	-0.38	<0.001

Примечание. n – число пар среднечасовых значений коррелируемых рядов.

В табл. 2 приведены оценки коэффициента корреляции r_s и его уровня значимости p между анализируемыми рядами. Согласно табл. 2, большинство связей характеризуются малыми значениями r_s (от -0.04 до 0.47), которые, тем не менее, значимы ($p < 0.05$) и высокосignификантны ($p < 0.001$). Исключение составляет случай между рядами \bar{P}_s и \bar{F} в эксперименте 2008, где корреляция отсутствует ($r_s = -0.02, p = 0.26$). Выявление таких слабых связей стало возможным в результате использования выборок большого объема, что обеспечило малую ошибку оценки r_s .

На рис. 4 представлены взаимные корреляционные функции (ВКФ) для рядов \bar{P}_s и \bar{V}' , которые выражают степень корреляции между рядами в зависимости от их взаимного смещения во времени. Сдвигаемым рядом является \bar{V}' . Как видно на рис. 4, во всех экспериментах значения ВКФ отрицательные, а максимальные значения функций наблюдаются при нулевом сдвиге \bar{V}' . Следовательно, с точностью до одного часа отрицательные возмущения \bar{V}' происходили одновременно с возмущениями \bar{P}_s . Поэтому в дальнейшем анализировались парные среднечасовые значения \bar{V}' и \bar{P}_s . Диаграммы рассеяния между ними в экспериментах показаны на рис. 5.

Известно, что при дожде и сильном ветре возникают значительные возмущения высокочас-

стотной геоакустической эмиссии [Купцов и др., 2004; Купцов, 2005] и атмосферного электрического поля [Двали, 1967; Двали, Калаиджева, 1980; Чалмерс, 1974]. По данным визуальных и одновременных с ними инструментальных наблюдений это происходило и в наших экспериментах, о чем свидетельствуют также результаты корреляционного анализа. Самые большие значения r_s наблюдаются между рядами \bar{P}_s, \bar{V}' и \bar{I}, \bar{U} (см. табл. 2).

Для устранения влияния плохой погоды далее рассматривались только те пары среднечасовых значений акустического давления \bar{P}_s и градиента потенциала \bar{V}' , когда в соответствующие часы не было дождя ($\bar{I} = 0$), сильного и умеренного ветра ($\bar{U} < 1.5$ м/с), низкого атмосферного давления ($\bar{P}_a > 995$ гПа). Последнее условие принято для еще большего уменьшения влияния циклонов на поведение геоакустической эмиссии и электрического поля. Диаграммы рассеяния между \bar{V}' и \bar{P}_s при такой спокойной погоде показаны на рис. 6.

По нашему мнению [Марапулец и др., 2010], представленная на рис. 6 связь между \bar{V}' и \bar{P}_s содержит две компоненты: фоновую, обусловленную слабым действием на электрическое поле, и геоакустическую эмиссию неучтенных метеорологических, а также других факторов и компоненту тектонической природы. Последняя формируется разными по знаку возмущениями электрического поля и геоакустической эмиссии,

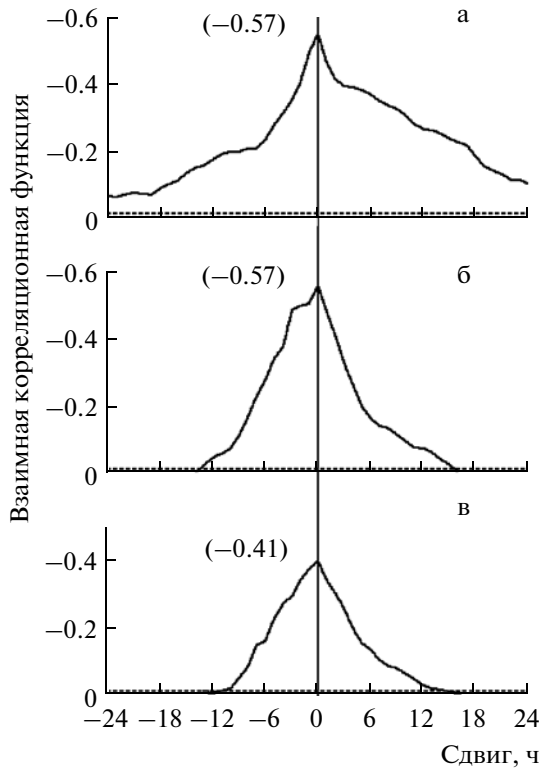


Рис. 4. Взаимные корреляционные функции для рядов среднечасовых значений градиента потенциала электрического поля и акустического давления в экспериментах 2006 (а), 2007 (б) и 2008 (в). Пунктирные линии – стандартные ошибки значений этих функций, в скобках указаны их максимальные значения.

возникающими во время активизации деформирования приповерхностных пород в районе пункта измерений. Такая активизация должна происходить неоднократно при интенсивно протекающем у Восточной Камчатки сеймотектоническом про-

цессе. Будем считать, что фоновая компонента проявляется при \bar{P}_s меньше некоторого значения \bar{P}_s^* , а тектоническая – когда \bar{P}_s больше \bar{P}_s^* , что происходит при активизации деформирования пород. Разные механизмы образования фоновой и тектонической компонент связи между электрическим полем и геоакустической эмиссией, обусловленные, прежде всего, разным местонахождением источников возмущений этих геофизических полей (атмосфера, литосфера), должны вызвать сложную зависимость между \bar{V}' и \bar{P}_s . Для разделения компонент связи применялась кусочно-линейная регрессия. Использовался квазиьютоновский метод оценивания параметров регрессии, точка разрыва по акустическому давлению, которая соответствует в первом приближении значению \bar{P}_s^* , определялась вычислительной программой [Халафян, 2008].

В экспериментах 2006, 2007 и 2008 \bar{P}_s^* равно 2.66, 0.46 и 0.41 мПа соответственно. Меньшие значения \bar{P}_s^* в экспериментах 2007 и 2008 обусловлены уменьшением среднего уровня акустического давления после перестановки гидрофона, о чем говорилось выше.

Для массивов данных (см. рис. 6) коэффициент корреляции Спирмена в экспериментах 2006, 2007 и 2008 равен -0.08 , -0.32 и -0.04 . Для этих же массивов в случае кусочно-линейной регрессии \bar{V}' на \bar{P}_s коэффициент множественной корреляции значительно больше и равен 0.77, 0.77 и 0.75 соответственно. Следовательно, кусочно-линейная регрессия лучше характеризует связь между \bar{V}' и \bar{P}_s , поэтому разделение указанных массивов на две части и оценка корреляции для каждой из них корректны. Параметры выделенной фоновой

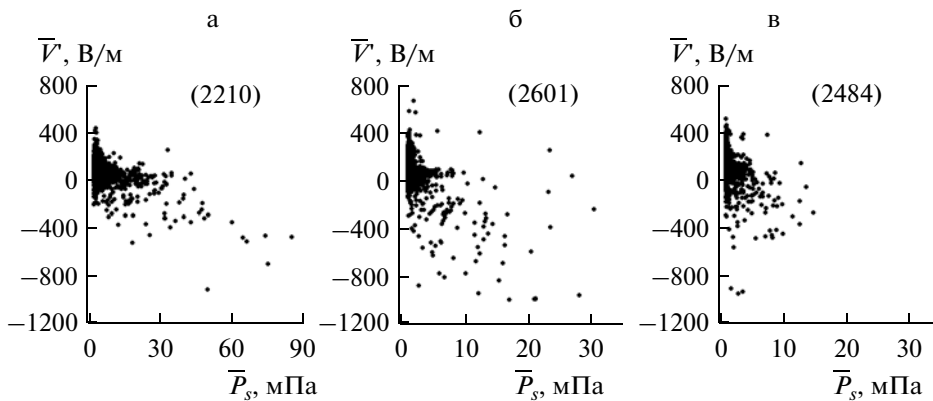


Рис. 5. Диаграмма рассеяния между среднечасовыми значениями градиента потенциала \bar{V}' электрического поля и акустического давления \bar{P}_s в экспериментах 2006 (а), 2007 (б) и 2008 (в). В скобках указано число пар \bar{V}' и \bar{P}_s .

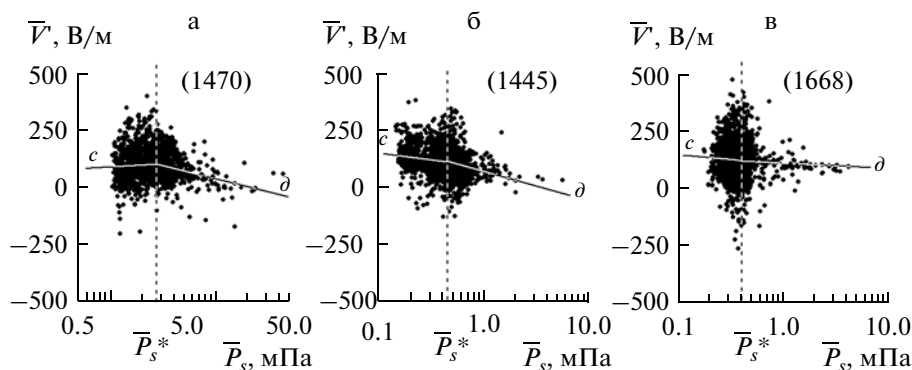


Рис. 6. Диаграмма рассеяния между среднечасовыми значениями градиента потенциала \bar{V}' электрического поля и акустического давления \bar{P}_s в экспериментах 2006 (а), 2007 (б) и 2008 (в) при спокойной погоде (см. в тексте).

Вертикальные пунктирные линии – значения \bar{P}_s^* , которые соответствуют точкам разрыва кусочно–линейной регрессии по \bar{P}_s ; *c*, *d* – линии, иллюстрирующие регрессию для фоновой и тектонической компоненты связи между \bar{V}' и \bar{P}_s . В скобках указано число пар \bar{V}' и \bar{P}_s .

и тектонической компонент связи между \bar{V}' и \bar{P}_s даны в табл. 3. Отметим, что некоторые значения \bar{V}' и \bar{P}_s на рис. 6 при \bar{P}_s немного больше \bar{P}_s^* могут представлять не удаленную часть фоновой компоненты связи, что возможно при точечной, а не при интервальной оценке момента разрыва кусочно–линейной регрессии по акустическому давлению.

Как видно из табл. 3, в экспериментах 2006 и 2007 имеется высокосignификантная корреляционная связь между \bar{V}' и \bar{P}_s в тектонической компоненте ($r_s = -0.27$ и -0.23 , $p < 0.001$). Коэффициент корреляции отрицателен по знаку, что соответствует разному знаку аномальных возмущений электрического поля и геоакустической эмиссии (см. рис. 1, 2). В эксперименте 2008 корреляционная связь между \bar{V}' и \bar{P}_s в тектонической компоненте статистически незначима ($r_s = -0.04$, $p = 0.35$). Следова-

тельно, связь между электрическим полем и геоакустической эмиссией в тектонической компоненте была только в экспериментах 2006 и 2007 гг.

Обнаруженная связь между электрическим полем и геоакустической эмиссией в тектонической компоненте не является, на первый взгляд, сильной. Однако полученные значения коэффициента корреляции ($r_s = -0.27$ и -0.23 , см. табл. 3) близки к его значениям между электрическим полем и интенсивностью дождя в этих же экспериментах ($r_s = -0.27$ и -0.28 , см. табл. 2), влияние которого на электрическое поле считается наиболее сильным [Двали, 1967; Чалмерс, 1974]. То, что связь между аномальными возмущениями электрического поля и геоакустической эмиссии более сильная, видно на рис. 1, 2. Малые значения коэффициента корреляции получены, вероятно, в результате использования среднечасовых значе-

Таблица 3. Параметры фоновой ($\bar{P}_s < \bar{P}_s^*$) и тектонической ($\bar{P}_s > \bar{P}_s^*$) компонент связи между среднечасовыми значениями электрического поля \bar{V}' и акустического давления \bar{P}_s в условиях спокойной погоды (см. в тексте)

Параметр	Эксперимент 2006, компонента связи		Эксперимент 2007, компонента связи		Эксперимент 2008, компонента связи	
	фоновая	тектоническая	фоновая	тектоническая	фоновая	тектоническая
<i>n</i>	969	501	792	653	1164	504
<i>r_s</i>	0.11	-0.27	-0.15	-0.23	-0.07	-0.04
<i>p</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.02	0.35

Примечание. *n* – число пар \bar{V}' и \bar{P}_s , *r_s* – коэффициент корреляции Спирмена, *p* – его уровень значимости.

ний величин, так как осреднение уменьшает амплитуду их аномальных возмущений и, следовательно, силу выявляемой связи. Тем не менее, рассмотрение среднечасовых значений оправдано. Оно позволяет выяснить при спокойной погоде наличие или отсутствие высокозначимой корреляционной связи в принятой выше тектонической компоненте.

Наличие связи между \bar{V}' и \bar{P}_s в тектонической компоненте анализировалось также с использованием ранговой корреляции Кендалла. В отличие от коэффициента корреляции Спирмена, коэффициент корреляции Кендалла τ имеет вероятностную интерпретацию и позволяет оценить вероятность разнонаправленных $G = (1 - \tau)/2$ и однонаправленных $Q = (1 + \tau)/2$ изменений переменных [Боровиков, 2003; Наследов, 2011]. Оценки значений этих параметров даны в табл. 4. В экспериментах 2006, 2007 коэффициент корреляции τ отличен от нуля и уровень его значимости меньше 0.001. Здесь $G > Q$, то есть вероятность разнонаправленных изменений \bar{V}' и \bar{P}_s , которые соответствуют разным по знаку аномальным возмущениям электрического поля и геоакустической эмиссии (см. рис. 1, 2, табл. 4), больше. В эксперименте 2008 этого нет, и формируемая данными изменениями связь в тектонической компоненте отсутствует.

Не исключено, что на формирование связи между электрическим полем и геоакустической эмиссией в тектонической компоненте могла влиять погода, особенно дождь, так как между ними и интенсивностью дождя наблюдается самая сильная корреляция (см. табл. 2). Для выяснения данного вопроса определялись суммы осадков, выпавших за время наличия парных среднечасовых значений \bar{V}' и \bar{P}_s . В экспериментах 2006, 2007 и 2008 эти суммы равны 128, 222 и 380 мм, а осадки выпали, соответственно, за 5.7, 7.6 и 12.7% времени, когда есть такие значения. Следовательно, оценка корреляции между изменениями электрического поля и геоакустической эмиссии проводилась в условиях ухудшения погоды с каждым новым экспериментом. Если связь между ними в тектонической компоненте формировалась метеорологическими процессами, то наиболее сильной она была бы в эксперименте 2008. Однако, несмотря на самые большие здесь значения коэффициента корреляции рядов \bar{V}' и \bar{P}_s с интенсивностью дождя (см. табл. 2), связь между \bar{V}' и \bar{P}_s в тектонической компоненте статистически незначима (см. табл. 3). Поэтому обнаруженная в экспериментах 2006, 2007 связь между электрическим полем и геоакустической эмисси-

Таблица 4. Оценки коэффициента корреляции Кендалла τ , его уровня значимости p , вероятности разнонаправленных G и однонаправленных Q изменений \bar{V}' и \bar{P}_s в тектонической компоненте связи

Эксперимент	τ	p	G	Q
2006	-0.19	<0.001	0.59	0.41
2007	-0.15	<0.001	0.58	0.42
2008	-0.03	0.29	0.51	0.49

ей в тектонической компоненте имеет не метеорологическое происхождение.

Отсутствие влияния погоды на формирование связи между \bar{V}' и \bar{P}_s в тектонической компоненте подтверждается также уменьшением максимального значения ВКФ для рядов \bar{V}' и \bar{P}_s в эксперименте 2008 (см. рис. 4), свидетельствующем об ослаблении связи между рядами. Заметим, что в этом эксперименте наблюдается самый большой размах \bar{V}' в фоновой компоненте (см. рис. 6в), который обусловлен, возможно, неполным устранением влияния плохой погоды.

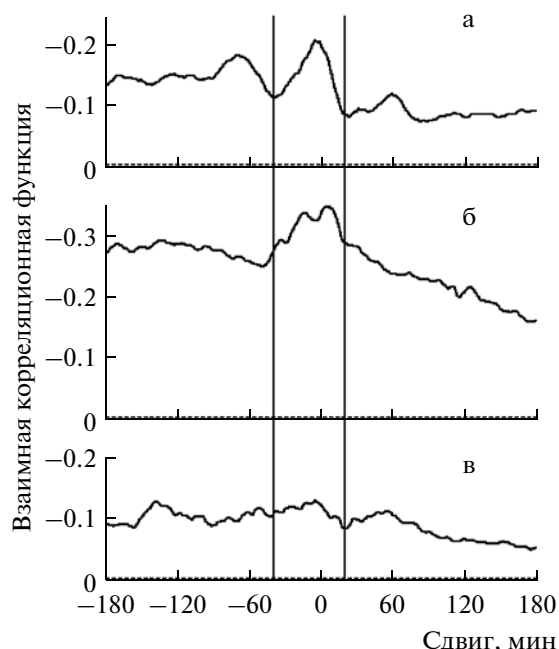


Рис. 7. Взаимные корреляционные функции для рядов среднeminутных значений градиента потенциала электрического поля и акустического давления в экспериментах 2006 (а), 2007 (б) и 2008 (в). Пунктирные линии – стандартные ошибки значений функций.

Как отмечалось выше, возмущения среднечасовых значений электрического поля и геоакустической эмиссии происходили одновременно (см. рис. 4). С целью выяснения сдвига возмущений этих величин внутри часового интервала рассматривались взаимные корреляционные функции для рядов среднeminутных значений градиента потенциала \tilde{V}' и акустического давления \tilde{P}_s . Эти значения являются средними из 15 измерений. Графики данных функций представлены на рис. 7, сдвигаемым рядом является \tilde{V}' . В экспериментах 2006, 2007 есть хорошо выраженное увеличение ВКФ при сдвиге \tilde{V}' примерно от -40 до 20 мин (см. рис. 7). Максимальные значения ВКФ находятся около нулевого сдвига, все значения ВКФ отрицательные. Следовательно, можно говорить, что в данных экспериментах были отрицательные возмущения \tilde{V}' , возникавшие с опережением до 20 мин и запаздыванием до 40 мин относительно возмущений \tilde{P}_s с наибольшим проявлением около нулевого сдвига. Это подтверждается, в частности, опережением уменьшения градиента потенциала V' относительно сильного увеличения акустического давления P_s (см. рис. 1), где оно равно 8.9 мин. Более слабые возмущения V' и P_s в $\sim 05:40-06:10$ (см. рис. 2) начинаются одновременно. Сложное поведение V' и P_s во время еще более слабых возмущений в $\sim 03:30-04:20$ (см. рис. 2) не позволяет определить моменты их начала. Как видно на рис. 7, в эксперименте 2008, когда была самая плохая погода, увеличения ВКФ в указанном диапазоне сдвига \tilde{V}' нет. Поэтому отрицательные возмущения \tilde{V}' , которые возникали в экспериментах 2006, 2007 с опережением до 20 мин и запаздыванием до 40 мин относительно возмущений \tilde{P}_s , не связаны с метеорологическими процессами.

Деформационная природа аномальных возмущений высокочастотной геоакустической эмиссии подтверждена совместными измерениями деформации приповерхностных пород в пункте “Карымшина” [Долгих и др., 2007], расположенном в 20 км юго-западнее пункта “Микижа”. Одновременные геоакустические, атмосферно-электрические и деформационные измерения, проведенные нами в этом пункте [Марапулец и др., 2011], показали, что разные по знаку аномальные возмущения геоакустической эмиссии и электрического поля возникают при увеличении скорости деформации приповерхностных пород во время их растяжения. При сжатии пород, несмотря на такие же скорости деформации, появляются только возмущения геоакустической эмиссии. Возмущения эмиссии и электрического поля зарегистри-

рованы в отсутствие дождя и сильного ветра, при слабо меняющемся атмосферном давлении и деформациях пород на два порядка больше приливных, что свидетельствует об их тектонической природе.

Наблюдаемое время затухания акустических импульсов, которые формируют геоакустическую эмиссию, равно $0.01-0.015$ с [Купцов и др., 2005]. Учитывая это и скорость продольных колебаний в осадочных породах на Камчатке примерно $1.8-2.5$ км/с [Аносов и др., 1978], расстояние ослабления сигнала, как произведение данных величин, будет $18-37$ м. В первом приближении оно сопоставимо с расстоянием до источника [Виноградов и др., 1980]. Поэтому источники регистрируемой акустической эмиссии находятся не дальше 37 м от гидрофона. В пунктах “Микижа” и “Карымшина” приповерхностные породы являются осадочными с толщиной слоя примерно 50 м [Купцов и др., 2005], то есть акустические сигналы генерируются в одинаковых средах. Следовательно, полученные в пункте “Карымшина” результаты можно использовать для подтверждения деформационной природы аномальных геоакустических возмущений в пункте “Микижа”.

Как показано выше, обнаруженная в экспериментах 2006, 2007 г. связь между электрическим полем и геоакустической эмиссией в тектонической компоненте имеет не метеорологическое происхождение. Учитывая результаты, полученные в пункте “Карымшина”, наиболее вероятной причиной этой связи являются растяжения приповерхностных осадочных пород в районе пункта измерений при активизации деформационного процесса. Отсутствие связи между электрическим полем и геоакустической эмиссией в эксперименте 2008 г. можно объяснить преимущественными сжатиями пород во время активизации этого процесса и появлением, в основном, только возмущений геоакустической эмиссии (см. рис. 6в). Отметим, что обнаруженная связь невозможна без активизации деформационного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Летом—осенью 2006—2008 г. на Камчатке в пункте “Микижа” одновременно измерялись геоакустическая эмиссия на частотах $2.0-6.5$ кГц, атмосферное электрическое поле у поверхности земли и метеорологические величины. Используя непараметрические методы корреляционного анализа, исследована связь между среднечасовыми значениями всех величин. Предложена методика выявления связи не метеорологического происхождения между возмущениями геоакустической эмиссии и атмосферного электрического

поля. Проведено сравнение результатов, полученных в разные годы.

С помощью предложенной методики в экспериментах 2006, 2007 гг. обнаружена статистически высокозначимая обратная связь между возмущениями геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля. В эксперименте 2008 г. эта связь статистически незначима. В дальнейшем авторами обнаружено, что формирующие такую связь разные по знаку возмущения геоакустической эмиссии и электрического поля возникают в условиях спокойной погоды при деформациях приповерхностных пород на два порядка больше приливных, что свидетельствует о тектонической природе деформаций. С учетом этого, наиболее вероятной причиной связи в экспериментах 2006, 2007 гг. является активизация деформирования приповерхностных осадочных пород в районе пункта измерений при сейсмотектоническом процессе.

Авторы благодарны д.ф.-м.н. Б.М. Шевцову за поддержку проведенных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Спивак А.А.* Роль тектонических нарушений в межгеосферных взаимодействиях на границе земная кора–атмосфера // ДАН. 2005. Т. 402. № 1. С. 92–97.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б. и др.* Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора–атмосфера // Физика Земли. 2006. № 7. С. 34–51.
- Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др.* Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 130 с.
- Благовещенский Ю.Н.* Тайны корреляционных связей в статистике. М.: Научная книга, 2009. 158 с.
- Боровиков В.* STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
- Виноградов С.Д., Кузнецова К.И., Москвина А. Г. и др.* Физическая природа разрыва и излучение сейсмических волн // Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 129–140.
- Войтов Г.И., Добровольский И.П.* Химические и изотопно-углеродные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах // Физика Земли. 1994. № 3. С. 20–31.
- Вуколов Э.А.* Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. М.: ФОРУМ, 2008. 464 с.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А.* Сейсмо-электромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 174 с.
- Гохберг М.Б.* Взаимодействие процессов в литосфере и у земной поверхности с внешними оболочками Земли // Геофизика на рубеже веков: Избранные труды ученых ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 163–169.
- Датчик напряженности электрического поля “Поле-2М”. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л.: ГГО им. А.И. Воейкова, 1991. 35 с.
- Двали Е.Р.* Электрическое состояние атмосферы и его связь с метеорологическими факторами // Труды Закавказского НИГМИ. Вып. 21(27). М.: Гидрометеоиздат, 1967. С. 83–128.
- Двали Е.Р., Калаиджева Л.Л.* Зависимость электрических характеристик атмосферы от некоторых атмосферных явлений // Труды ГГО. Вып. 401. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. С. 118–122.
- Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А. и др.* Деформационные и акустические предвестники землетрясений // ДАН. 2007. Т. 413. № 1. С. 96–100.
- Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М.* Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке // Эл. журнал “Исследовано в России”. 2004. Т. 7. С. 2809–2818. [Электронный ресурс]. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/262.pdf> (дата обращения: 27.03.2013).
- Купцов А.В.* Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59–65.
- Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М.* Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 45–59.
- Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А. и др.* О связи высокочастотной акустической эмиссии приповерхностных пород с электрическим полем в приземном слое атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 71–76.
- Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Мищенко М.А., Шевцов Б.М.* Связь высокочастотной геоакустической эмиссии с электрическим полем в атмосфере при сейсмотектоническом процессе // ДАН. 2010. Т. 431. № 2. С. 242–245.
- Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Ларионов И.А., Мищенко М.А.* Одновременный отклик высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля на деформирование приповерхностных осадочных пород // ДАН. 2011. Т. 440. № 3. С. 403–406.
- Наследов А.* SPSS 19: профессиональный статистический анализ данных. СПб.: Питер, 2011. 400 с.
- Петрунин Ю.Ю.* Информационные технологии анализа данных. Data analysis. М.: КДУ, 2008. 292 с.
- Реброва О.Ю.* Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: МедиаСфера, 2002. 312 с.
- Руленко О.П.* Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
- Руленко О.П.* Тензочувствительность предсейсмических отрицательных аномалий электрического поля в приземном воздухе // Сборник научных трудов Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир: Транзит ИКС, 2003. Т. II. С. 82–85.
- Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Спивак А.А.* Приповерхностная геофизика и взаимодействие геосфер // Динамические процессы во взаи-

модействующих геосферах. Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2006. С. 186–195.

Спивак А.А. Актуальные проблемы взаимодействия геосфер на приповерхностных участках континентальной земной коры // Проблемы взаимодействующих геосфер. Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2009. С. 211–221.

Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. М.: Бинном, 2008. 512 с.

Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 421 с.

Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. академика Садовского М.А. М.: Наука, 1982. 88 с.

AN ANALYSIS OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN HIGH-FREQUENCY GEOACOUSTIC EMISSIONS AND THE ELECTRICAL FIELD IN THE ATMOSPHERE NEAR THE GROUND SURFACE

O. P. Rulenko^{a, b}, Yu. V. Marapulets^b, and M. A. Mishchenko^b

^a *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

^b *Institute of Space Physics Research and Radio Wave Propagation, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, village of Paratunka, Kamchatskii Krai, 684034 Russia*

e-mail: marpl@ikir.ru

Received March 27, 2012

Abstract—The influence of the lithosphere on the atmosphere near their interface in a seismic region was studied during summer–autumn 2006–2008 in Kamchatka by simultaneous measurements of geoaoustic emissions at frequencies of 2.0–6.5 kHz, the atmospheric electrical field at the ground surface, and meteorological quantities at a single site. We used nonparametric methods of correlation analysis to study the relationships between the mean hourly values of all the quantities concerned. After eliminating cases of bad weather, as well as identifying the weak influence of unaccounted-for meteorological and other factors in the 2006 and 2007 experiments, we found a statistically significant negative relationship between disturbances of geoaoustic emissions and those of the electrical field. The relationship is of a non-meteorological origin and is statistically not significant in the 2008 experiment. The most likely cause of this relationship consists in the activation of strain variation in near-surface sedimentary rocks around the measurement site during the seismotectonic process.