

УДК 534.23:551.594.11

## СВЯЗЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В АТМОСФЕРЕ ПРИ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

© 2010 г. Ю. В. Марапулец, О. П. Руленко, М. А. Мищенко, Б. М. Шевцов

Представлено академиком В.В. Адушкиным 29.09.2009 г.

Поступило 29.09.2009 г.

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 воздух массы и энергии. При этом наблюдаются трансформация и перераспределение энергии между различными геофизическими полями. Наиболее сильно литосферно-атмосферное воздействие проявляется в сейсмоактивных регионах на заключительной стадии подготовки землетрясений, когда усиливается деформирование пород [1–5].

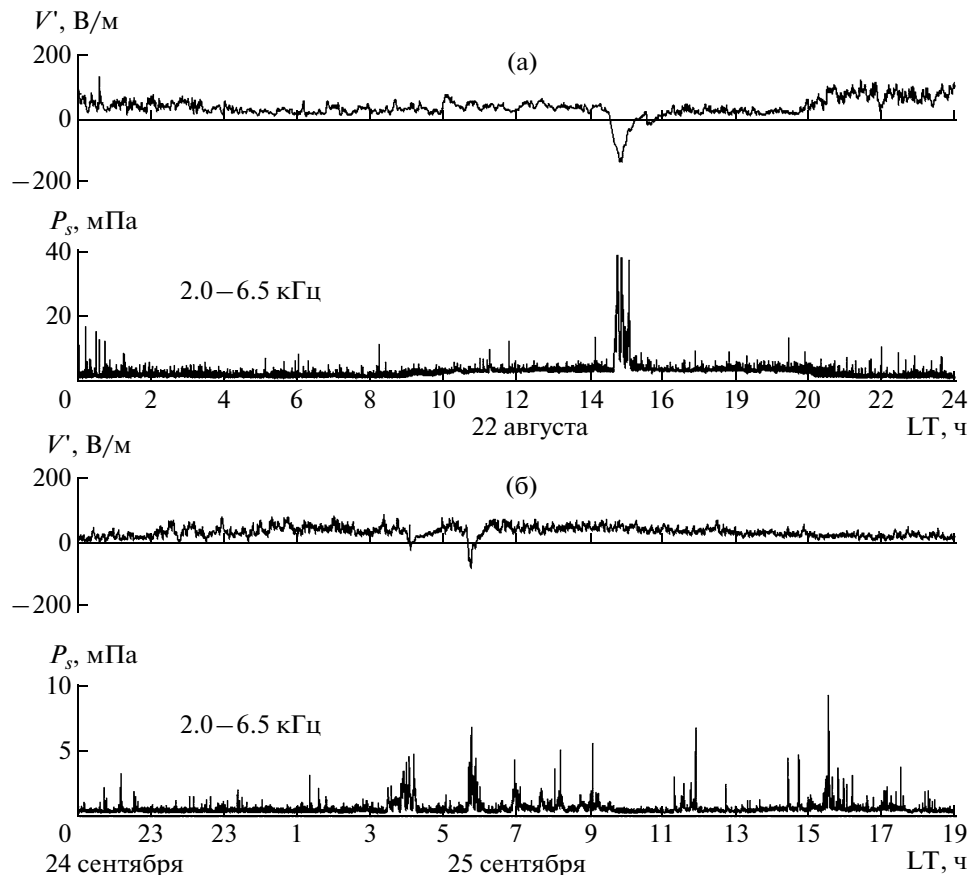
Исследования на Камчатке показали, что при усилении деформирования приповерхностных осадочных пород в результате образования трещин и микросмещений возникают возмущения высокочастотной геоакустической эмиссии. Они наблюдаются на частотах в единицы килогерц в интервале до полутора суток перед землетрясениями и расстоянии первые сотни километров от эпицентра [6, 7]. Перед землетрясениями регистрируются аномальные возмущения электрического поля в атмосфере, которые имеют также деформационную природу и аналогичное время упреждения [8]. Поэтому актуальны совместные исследования высокочастотной геоакустической эмиссии и электрического поля. Они представляют интерес как для понимания процессов, протекающих в литосфере на заключительной стадии подготовки землетрясений, так и происходящего при этом литосферно-атмосферного воздействия.

В августе–октябре 2005 г. в 28 км запад-юго-западнее г. Петропавловска-Камчатского впервые проведены совместные измерения геоакустической эмиссии и электрического поля в атмосфере [9]. Обнаружена связь между аномальными возмущениями эмиссии в килогерцевом диапазоне частот и электрического поля. Она может проявляться как в сейсмически спокойные периоды, так и на заключительной стадии подготовки землетрясения, что свидетельствует о ее сейсмо тектонической природе. Исследования продолжены 27 июня–16 октября 2006 г. (эксперимент 2006) и 28 июня–24 октября 2007 г. (эксперимент 2007). Измерялись накопленное за 4 с акустическое давление  $P_s$  в диапазоне частот 2.0–6.5 кГц и вертикальный градиент потенциала  $V'$  электрического поля на высоте 7 см над землей. В указанном диапазоне частот  $P_s$  наиболее сильно отражаются появление и динамика аномальных геоакустических возмущений [6, 7]. Одновременно регистрировались атмосферное давление, скорость ветра, температура воздуха, его относительная влажность и интенсивность дождя. Измерительный комплекс описан в [9].

Анализ данных показал, что в условиях спокойной погоды (отсутствие дождя, сильного и умеренного ветра, слабо меняющееся атмосферное давление) иногда регистрируются аномальные возмущения электрического поля и геоакустической эмиссии. Они заключаются в уменьшении градиента потенциала  $V'$  вплоть до изменения знака при значительном, как правило с резким началом, увеличении акустического давления  $P_s$  (рис. 1).

Рассматривалась корреляция между временными рядами среднечасовых значений всех величин. Поскольку распределения рядов значительно отличаются от нормального, использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $r_s$ . Он менее чувствителен к выбросам и погрешностям в результатах наблюдений, а также позволяет измерять монотонные нелинейные связи [10]. Согласно оценкам  $r_s$  и уровня значимости  $p$ , между рядами среднечасовых значений электриче-

*Институт космических исследований  
и распространения радиоволн  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук,  
с. Паратунка Камчатского края  
Институт вулканологии и сейсмологии  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук,  
Петропавловск-Камчатский*



**Рис. 1.** Запись градиента потенциала  $V'$  электрического поля и акустического давления  $P_s$  в эксперименте 22 августа 2006 г. (а) и 24–25 сентября 2007 г. (б).

ского поля, акустического давления и метеовеличин существуют значимые ( $p < 0.05$ ) и высокосignимые ( $p < 0.001$ ) связи. При этом ветер и особенно дождь оказывают наибольшее влияние на электрическое поле и акустическое давление (табл. 1). Атмосферное давление, температура воздуха и его относительная влажность влияют значительно слабее. Поэтому рассматривалась связь только между теми парами среднечасовых значений градиента потенциала  $V'$  и акустического давления  $P_s$ , когда отсутствовал дождь, среднечасовые значения скорости ветра были меньше 1.5 м/с, а атмосферного давления больше 995 гПа (рис. 2). Последнее условие принято для еще большего устранения влияния циклонов.

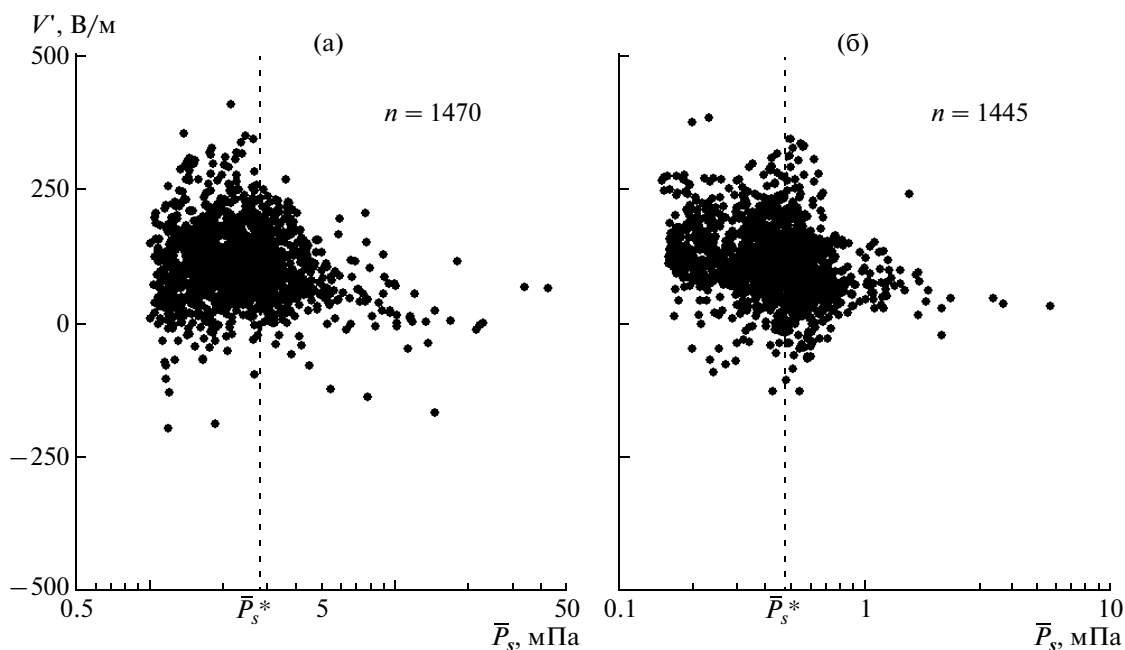
Представленная на рис. 2 связь содержит, по мнению авторов, две компоненты: фоновую, обусловленную слабым действием неучтенных метеорологических и других факторов, и тектоническую, которая вызвана усилением деформирования приповерхностных пород. Поскольку у Восточной Камчатки интенсивно протекает сейсмотектонический процесс, такое усиление должно происходить неоднократно за время экспериментов. Фоновая компонента будет прояв-

ляться при  $\bar{P}_s$  меньше некоторого значения  $\bar{P}_s^*$ , а тектоническая — когда  $\bar{P}_s$  больше  $\bar{P}_s^*$ , что происходит при усилении деформирования пород.

Для разделения фоновой и тектонической компонент связи между  $\bar{V}'$  и  $\bar{P}_s$  применялась кусочно-линейная регрессия. Использовался квазинытоновский метод оценивания параметров регрессии; точка разрыва по акустическому давлению, которая соответствует в первом прибли-

**Таблица 1.** Коэффициент корреляции Спирмена между рядами среднечасовых значений скорости ветра, интенсивности дождя, градиента потенциала электрического поля и акустического давления;  $p < 0.001$

| Условия | Эксперимент | Электрическое поле | Акустическое давление |
|---------|-------------|--------------------|-----------------------|
| Ветер   | 2006        | –0.08              | 0.19                  |
|         | 2007        | –0.11              | 0.22                  |
| Дождь   | 2006        | –0.27              | 0.34                  |
|         | 2007        | –0.28              | 0.31                  |



**Рис. 2.** Связь между среднечасовыми значениями градиента потенциала  $V'$  электрического поля и акустического давления  $P_s$  в эксперименте 2006 (а) и 2007 (б);  $n$  – число пар  $V'$  и  $P_s$ .

жении значению  $\bar{P}_s^*$ , оценивалась вычислительной программой. В эксперименте 2006 и 2007  $\bar{P}_s^*$  равно соответственно 2.66 и 0.46 мПа. Отличие значений акустического давления в экспериментах связано с перестановкой датчика на несколько метров после эксперимента 2006, что вызвало уменьшение среднего уровня высокочастотной геоакустической эмиссии. Параметры фоновой и тектонической компонент связи даны в табл. 2.

Согласно табл. 2, обе компоненты имеют высокозначимую корреляционную связь между  $\bar{V}'$  и  $\bar{P}_s$ . У тектонической компоненты коэффициент корреляции больше и отрицателен в экспериментах, что соответствует знаку связи между аномальными возмущениями исходных значений

электрического поля и акустического давления (рис. 1). Фоновая компонента имеет разный знак в экспериментах. Это можно объяснить разным влиянием на  $\bar{V}'$  и  $\bar{P}_s$  неучтенных метеорологических и других факторов.

Связь между электрическим полем и акустическим давлением у тектонической компоненты не является, на первый взгляд, сильной (табл. 2). Однако она сопоставима в экспериментах с влиянием дождя на электрическое поле (табл. 1), которое считается одним из наиболее сильных в атмосферном электричестве [11]. Занижение связи вызвано рассмотрением среднечасовых значений анализируемых величин, поскольку при усреднении уменьшается амплитуда аномальных возмущений их исходных значений и, как следствие, сила выявляемой связи. Тем не менее использование среднечасовых значений оправдано, так как позволяет установить сам факт наличия связи на выборках большого объема.

Наиболее вероятной причиной обнаруженной связи является усиление деформирования приповерхностных осадочных пород в районе пункта измерений. При этом в результате образования трещин по границам неоднородностей возникают возмущения высокочастотной геоакустической эмиссии [12]. Согласно [7], наблюдаемые акустические сигналы генерируются трещинами, удаленными до первых десятков метров от датчика. Источником аномальных возмущений электрического поля, по мнению авторов, является

**Таблица 2.** Параметры фоновой ( $\bar{P}_s < \bar{P}_s^*$ ) и тектонической ( $\bar{P}_s > \bar{P}_s^*$ ) компонент связи между  $\bar{V}'$  и  $\bar{P}_s$

| Параметр | Эксперимент 2006, компонента связи |               | Эксперимент 2007, компонента связи |               |
|----------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|
|          | фоновая                            | тектоническая | фоновая                            | тектоническая |
| $n$      | 969                                | 501           | 792                                | 653           |
| $r_s$    | 0.11                               | –0.27         | –0.15                              | –0.23         |
| $p$      | <0.001                             | <0.001        | <0.001                             | <0.001        |

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

образование у земли слоя воздуха с повышенной ионизацией. В результате возникнет отрицательный вертикальный градиент электропроводности и, как следствие, отрицательный объемный заряд [11]. Он частично или полностью компенсирует положительный объемный заряд электродного эффекта, что вызовет уменьшение и даже изменение знака регистрируемого поля. Выравнивание концентрации ионов по высоте приведет к исчезновению градиента электропроводности воздуха и аномалии электрического поля.

Повышенная ионизация воздуха у поверхности земли может быть вызвана усилением ионизирующего излучения из почвы и более сильным выходом из нее радона и торона [11, 13, 14] с последующим накоплением в условиях спокойной погоды. Оба процесса должны иметь место при усилении деформирования приповерхностных пород. Появление при этом отрицательных аномалий электрического поля в атмосфере подтверждается регистрацией их перед землетрясениями [8] и при увеличении объемной активности подпочвенного радона [5].

Таким образом, после исключения из рассмотрения случаев плохой погоды (дождя, сильного и умеренного ветра, низкого атмосферного давления), а также выделения слабого влияния неучтенных метеорологических и других факторов в двух летне-осенних экспериментах обнаружена высокосignифицирующая отрицательная связь между возмущениями электрического поля в атмосфере и высокочастотной геоакустической эмиссии. Наиболее вероятно, что она вызвана усилением деформирования приповерхностных осадочных пород в районе пункта измерений при сейсмотектоническом процессе. Для выяснения природы связи необходимы комплексные исследования у границы земля-воздух в обеих средах. Обнаруженная связь свидетельствует еще об одном про-

явлении воздействия литосферы на приземную атмосферу в сейсмоактивном регионе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16 “Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы” и Президиума ДВО РАН (грант 06-I-П16–070).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтов Г.И., Добровольский И.П.* // Физика Земли. 1994. № 3. С. 20–31.
2. *Гохберг М.Б.* Геофизика на рубеже веков: Избранные труды ученых ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 163–169.
3. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* // ДАН. 2005. Т. 402. № 1. С. 92–97.
4. *Спивак А.А.* Динамические процессы во взаимодействующих геосферах. М.: Геос, 2006. С. 186–195.
5. *Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б. и др.* // Физика Земли. 2006. № 7. С. 34–51.
6. *Купцов А.В.* // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59–65.
7. *Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М.* // Вулканология и сейсмология. 2005. № 4. С. 1–14.
8. *Руленко О.П.* // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
9. *Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А. и др.* // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 71–76.
10. *Боровиков В.* Statistica. Искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
11. *Чалмерс Дж.А.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 421 с.
12. *Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А. и др.* // ДАН. 2007. Т. 413. № 5. С. 96–100.
13. *Брикар Дж.* Проблемы электричества атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. С. 68–105.
14. *Смирнов В.В.* Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 312 с.