

УДК 551.25.254: [551.594.11:551.510.71:534.23]

СОВМЕСТНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, РАДОНА, ТОРОНА И АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

© 2019 г. О. П. Руленко^{1,2*}, Ю. В. Марапулец^{2**},
Ю. Д. Кузьмин^{3***}, А. А. Солодчук²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

²Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия

³Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: rulenko@kscnet.ru

**E-mail: marpl@ikir.ru

***E-mail: kuzu@emsd.ru

Поступила в редакцию 28.05.2018 г.

Принята в печать 10.09.2018 г.

На основании обобщения и анализа имеющихся в литературе результатов теоретических исследований и натурных наблюдений рассмотрена возможность совместного возмущения геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля перед землетрясением. Предложена схема образования такого возмущения при наличии в пункте измерений приповерхностных осадочных пород и их растяжении. Для его обнаружения на Камчатке летом–осенью 2012–2013 гг. впервые проведены одновременные измерения геоакустической эмиссии, радона, торона, атмосферного электрического поля и зарегистрировано их совместное аномальное возмущение.

Ключевые слова: растяжение приповерхностных осадочных пород, геоакустическая эмиссия, радон, торон, атмосферное электрическое поле, совместные возмущения.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019576-86>

ВОЗМОЖНОСТЬ СОВМЕСТНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Граница между литосферой и атмосферой характеризуется сильными изменениями свойств контактирующих сред, большими потоками массы и энергии, широким перечнем одновременно существующих разнородных полей, их взаимодействием и преобразованием [Адушкин и др., 2006; Адушкин, Спивак, 2012]. Составной частью взаимодействия твердой и газообразной геосфер является воздействие литосферы на атмосферу. Оно проявляется, в частности, в аномальных изменениях геофизических полей в приземной атмосфере в результате геодинамических процессов в земной коре и происходит интенсивно на заключительной стадии подготовки землетрясений. В это время у границы земля–атмосфера в обеих средах регистрируются аномальные возмущения разных по своей

сущности полей. Они возникают перед землетрясениями магнитудой $M > 4-5$ на расстоянии до первых сотен километров от эпицентра и интерпретируются как предвестники [Сидорин, 1992; Соболев, 1993; Cicerone et al., 2009]. Среди них наблюдаются увеличение геоакустической эмиссии в килогерцовом диапазоне частот [Купцов, 2005; Купцов и др., 2005; Марапулец, Шевцов, 2012; Моргунов и др., 1991; Gregori et al., 2010], объемной активности подпочвенного радона [Войтов, 1998; Уткин, Юрков, 2010; Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др., 2015; Virk, 1994] и бухтообразное уменьшение при спокойной погоде атмосферного электрического поля с изменением знака [Руленко, 2000; Руленко и др., 1992; Токтосопиев, 2007; Choudhury et al., 2013; Hao et al., 2000; Kachakhidze et al., 2009; Nikiforova et al., 2007; Silva et al., 2011].

Общепринято считать, что при подготовке землетрясения ведущую роль играют механические процессы. Они вызывают изменения напряженного состояния земной коры, которые в результате ее неоднородной иерархически блоковой структуры обуславливают сложное пространственно-временное деформирование пород, в том числе — их локальные растяжения и сжатия.

Накопленные к настоящему времени результаты теоретических исследований и натуральных наблюдений позволяют говорить, что предсейсмические возмущения геоакустической эмиссии, радона и атмосферного электрического поля могут возникать совместно при растяжении приповерхностных осадочных пород в пункте измерений [Долгих и др., 2007; Куповых и др., 1998; Купцов и др., 2007; Марапулец и др., 2011; Марапулец, Шевцов, 2012; Морозов, 2011; Руленко, 2000; Уткин и др., 2006; Уткин, Юрков, 2010; Kulkarni, Kamra, 2001; и т. д.]. Растяжение этих пород, имеющих полидисперсную флюидонасыщенную пористую структуру малой прочности, будет сопровождаться относительными микросмещениями фрагментов, их взаимодействием и, как следствие, генерацией акустических сигналов. В результате раскрытия поверхностей контактов и усиления эманирования пород, а также открытия изолированных пор и расширения существующих трещин, увеличится содержание радона в подпочвенном газе и его поступление в атмосферу, которое усилит ионизацию приземного воздуха. При хорошей погоде это сопровождается известным в атмосферном электричестве появлением у земной поверхности в слое воздуха толщиной от десятых долей метра до нескольких метров отрицательного электрического заряда [Куповых и др., 1998; Norpel, 1967; Kulkarni, Kamra, 2001]. Его средняя плотность может быть около -700 [Khera, Raina, 1978], а наибольшая — достигать -1200 [Pawar, Kamra, 2000] и даже -3200 пКл/м³ [Kamra, 1982], что сравнимо со средней плотностью объемного заряда в грозовых облаках ($300-3000$ пКл/м³) [Имянитов и др., 1971]. Вблизи такого значительного по величине локального отрицательного заряда (особенно ниже) будет уменьшаться нормальное атмосферное электрическое поле и изменяться его знак [Kamra, 1982; Pawar, Kamra, 2000]. Появление и диссипация данного заряда вызовут бухтообразное уменьшение этого поля, которое, как отмечалось выше, наблюдается перед землетрясениями. Общим фактором, способствующим протеканию указанных процессов, является фрагментарность

осадочных пород и, как следствие, их повышенная деформируемость. Заметим, что приповерхностные осадочные породы широко распространены на Земле, около 80% поверхности континентов покрыто осадочными породами [Гаррелс, Маккензи, 1974].

Кроме радона, в приповерхностных породах генерируется другой радиогенный газ — торон, который также поступает в атмосферу. Несмотря на малый период полураспада (55.6 с), он ионизирует приземный воздух и участвует в образовании отрицательного объемного заряда и уменьшении атмосферного электрического поля у земной поверхности [Адушкин и др., 1998; Войтов и др., 2000; Марапулец и др., 2011]. Однако влияние торона на возмущение этого поля перед землетрясениями не исследовалось. В литературе есть три случая совместных измерений радона и торона в почвенном газе в сейсмоактивном регионе [Руленко, Кузьмин 2015; Уткин и др., 2006; Yang et al., 2005]. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении перед землетрясением объемной активности обеих эманаций. Поэтому целесообразны их совместные измерения.

О возможности рассматриваемого совместного возмущения свидетельствуют одновременное увеличение геоакустической эмиссии и уменьшение атмосферного электрического поля при растяжении приповерхностных осадочных пород [Марапулец и др., 2011], увеличение подпочвенного радона и торона при растяжении этих пород перед землетрясением [Уткин и др., 2006; Уткин, Юрков, 2010], уменьшение атмосферного электрического поля при увеличении подпочвенного радона [Косарев, Спивак, 2012] и связь вариаций плотности объемного электрического заряда в приземном воздухе с вариациями радона [Анисимов и др., 2013]. С позиции модели горных пород как трещиновато-пористой среды существует область квазиупругих деформаций, при которых сжатие вызывает уменьшение выделения радона, а растяжение — увеличение [Уткин, Юрков, 2010].

Таким образом, перед землетрясением у границы земля—атмосфера возможно совместное возмущение геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля. Как и предвестники в других полях, оно будет порождаться изменением поля механических напряжений в зоне подготовки землетрясения и возникать в результате преобразования: напряжение—деформация растяжения приповерхностных осадочных пород в пункте измерений.

Возмущение каждой субстанции будет иметь свои особенности генезиса, но общую деформационную природу. При этом увеличение геоакустической эмиссии и эманаций являются прямым, а уменьшение атмосферного электрического поля – опосредованным откликом на растяжение данных пород, вызванное процессом подготовки землетрясения. В результате выхода радона и торона из земли и влияния на электрическое состояние воздуха будет происходить воздействие земной коры на приземную атмосферу и формирование атмосферного электрического предвестника.

Анализ возмущений нескольких геофизических полей улучшает надежность выделения предвестника землетрясений и может служить основанием при изучении процесса подготовки [Киссин, 2013; Садовский, Писаренко, 1991; Соколов, Пономарев, 2003]. В нашем случае, когда в пункте измерений возникает растяжение приповерхностных осадочных пород и качественно

понятна связь между увеличением геоакустической эмиссии, радона, торона и уменьшением атмосферного электрического поля, их совместное исследование заслуживает обоснованного внимания. Если растяжение пород вызвано процессом подготовки землетрясения, возможно совместное возмущение, которое будет его предвестником. Схема образования такого возмущения представлена на рис. 1. Для повышения надежности его выявления необходимы регистрация атмосферного давления, скорости ветра и осадков, которые влияют на поведение геоакустической эмиссии, эманаций и атмосферного электрического поля [Марапулец, Шевцов, 2012; Руленко и др., 2014; Фирстов, Рудаков, 2003].

До настоящего времени совместное исследование геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля не проводилось. Оно актуально для выявления комплексного предвестника землетрясений и изучения воздействия земной коры на приземную атмосферу в сейсмоактивных регионах. В связи с этим на Камчатке летом–осенью 2012–2013 гг. впервые были проведены одновременные измерения геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля. Они реализованы на одной инструментальной базе и в одном пункте, что позволяет сравнить полученные результаты.

РАЙОН И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Измерения объемной активности радона R_n , торона T_n , акустического давления в килогерцовом диапазоне частот P_s и градиента потенциала V' атмосферного электрического поля проводились в районе Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки. Ранее при отдельных измерениях здесь зарегистрированы аномальное увеличение R_n [Рудаков, 2002; Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др., 2015], P_s [Купцов, 2005; Купцов и др., 2005; Марапулец, Шевцов, 2012], уменьшение V' с изменением знака [Руленко и др., 1992] и увеличение P_s вместе с уменьшением V' [Купцов и др., 2007]. Эти аномалии наблюдались перед землетрясениями с магнитудами $M=4-7$ на расстояниях $R=110-310$ км от эпицентра. В данном районе впервые перед землетрясением зарегистрировано появление отрицательного объемного электрического заряда в приземном воздухе [Руленко, 2008]. При измерении градиента потенциала V' одновременно на двух высотах наблюдалось его аномальное уменьшение с изменением знака только у земной поверхности [Руленко и др.,

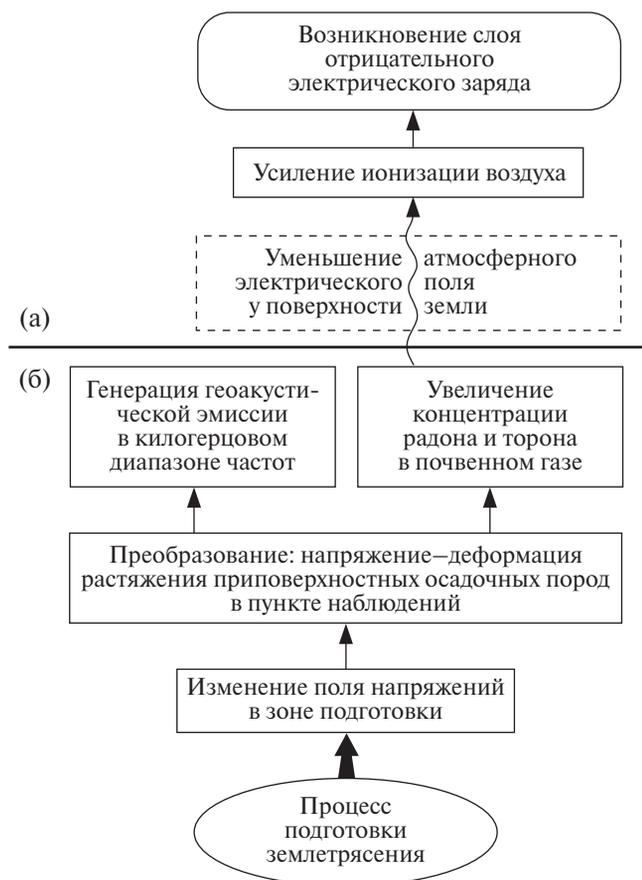


Рис. 1. Схема образования совместного возмущения геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля перед землетрясением: (а) – приземный воздух; (б) – приповерхностные осадочные породы.

2010], что свидетельствует о появлении здесь отрицательного объемного заряда. Обнаружена статистически высокозначимая связь между увеличениями акустического давления P_s и уменьшениями градиента потенциала V' при спокойной погоде [Марапулец и др., 2010].

Измерения объемной активности радона, торона и акустического давления проводились 27 августа–27 октября, а градиента потенциала атмосферного электрического поля 27 августа–17 октября 2012 г. в пункте «Карымшина» (52.83 с. ш., 158.13° в. д.), расположенном в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы [Руленко и др., 2015]. Местоположение пункта показано на рис. 2.

Объемная активность эманаций измерялась один раз в 30 мин при помощи автоматизированного радиометра СРС-1, разработанного и изготовленного в ООО «НТМ-Защита». Радиометр характеризуется чувствительностью не менее $1.4 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1} \text{ Бк}^{-1} \text{ м}^3$, 30%-ным пределом допускаемой относительной погрешности и средним уровнем собственного фона 5 и 0.1 Бк/м³ для радона и торона соответственно. Одновременно с объемной активностью эманаций при помощи встроенной климатической камеры изме-

рялось атмосферное давление. Электропитание радиометра было от автономного источника.

Акустическое давление регистрировалось в диапазоне частот 0.7–2.0 кГц с накоплением значений за 4 с. Использовались три пьезокерамических гидрофона, расставленные треугольником на расстоянии 10–35 м друг от друга в искусственных водоемах размером $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$, которые были изолированы от воздействия дождя и ветра. Гидрофоны имели диаграмму направленности 60°, чувствительность вместе с преусилителями первые сотни мВ/Па и были ориентированы вертикально вниз.

Градиент потенциала атмосферного электрического поля измерялся один раз в 4 с на высоте 7 см от земной поверхности при помощи электростатического флюксметра «Поле-2 М», разработанного и изготовленного в ГГО им. А.И. Воейкова. Флюксметр имел пороговую чувствительность примерно 3 В/м и время установления показаний на уровне 0.9, равное 1 с. Его первичный преобразователь был установлен в центре ровной поляны размером примерно $20 \times 20 \text{ м}^2$, окруженной кустарником высотой около 3 м. В таких условиях у земной поверхности ослабевает ветер и уменьшается его влияние на поведение здесь электрического поля. Во время измерений возле первичного преобразователя регулярно срезалась трава для устранения влияния на уменьшение квазипостоянной составляющей атмосферного электрического поля. Первичный преобразователь флюксметра находился частично в ямке размером $0.3 \times 0.3 \text{ м}^2$ и глубиной 0.4 м, из которой через трубку отбирался газ для измерения объемной активности радона и торона. Эманации поступали в ямку из грунта, с поверхности которого выходили в атмосферу. При анализе газа из ямки они слабо разбавлены воздухом, что облегчает измерения. Объем пробы газа составлял 8% от свободного объема в ямке, поэтому влиянием отбора на поступление радона и торона в ямку можно пренебречь.

Радиометр и флюксметр находились в 50 м от площадки, где были установлены гидрофоны. Для устранения взаимного влияния геоакустических и атмосферно-электрических данных сигналы с гидрофонов и флюксметра поступали на разные аналого-цифровые преобразователи (16- и 14-разрядные, соответственно).

При помощи цифровой метеостанции Davis Vantage Pro2 один раз в 1 мин на высоте 8 м от земли измерялись атмосферное давление, скорость ветра и интенсивность дождя. Метеостанция находилась в 140 м от площадки, где

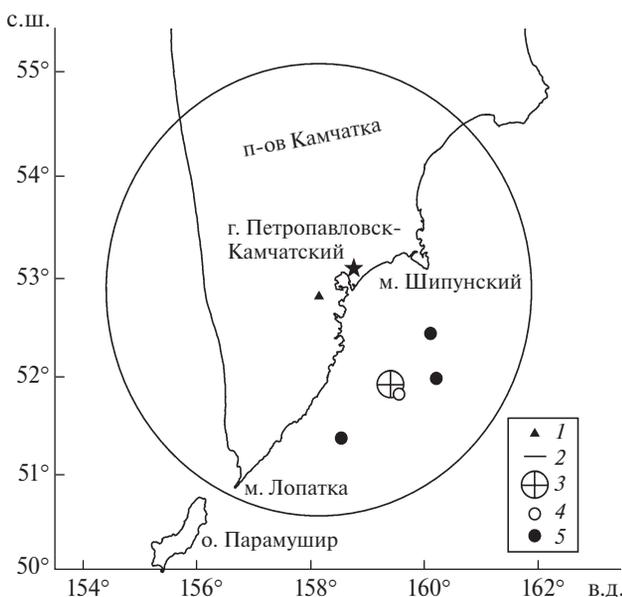


Рис. 2. Расположение пункта наблюдений и эпицентров землетрясений: 1 – пункт «Карымшина»; 2 – окружность радиусом 250 км, обозначающая область выборки землетрясений с энергетическим классом $K_s \geq 9.0$; 3 – эпицентр землетрясения 15 октября 2012 г. с $K_s = 13.5$ ($M_w = 5.6$); 4 – его самый сильный афтершок с $K_s = 12.6$; 5 – эпицентры землетрясений с $K_s > 12.0$ во время эксперимента 2013 г.

были радиометр и флюксметр. В 120 м от этой площадки, возле метеостанции, есть скважина № 99-8 глубиной 19 м. Ее геологическая колонка представлена валунно-галечными отложениями с песчанно-глинистым заполнителем (0–5 м), глыбово-щебнистыми отложениями с глинистым заполнителем (5–14 м) и валунно-галечными отложениями с песчаным заполнителем (14–19 м). Статический уровень воды равен 13.7 м. Таким образом, приповерхностные породы в районе пункта измерений являются осадочными. По данным бурения толщина их слоя равняется примерно 50 м [Купцов и др., 2005].

Измерения геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля были продолжены 18 июля–17 октября 2013 г. Аппаратура и методика наблюдений остались прежними.

В качестве характеристики локальной сейсмической активности рассматривалась накопленная энергия землетрясений с энергетическим классом $K_s \geq 9.0$, произошедших на эпицентральной расстоянии $R \leq 250$ км от пункта «Карымшина» (рис. 2). Использовались данные каталога Камчатского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН (<http://emsd.ru>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент 2012 г. На рис. 3 представлены графики накопления энергии рассматриваемых землетрясений, вариации атмосферного давления, измеренного при помощи климатической камеры радиометра, и объемной активности эманаций. За период измерений, равный 52 суткам, только 2 октября наблюдалось сильное увеличение радона и торона. Максимальные значения R_n и T_n были 526 и 25 Бк/м³, соответственно, и значительно превышали фоновый уровень. Как видно на рис. 3, во время этого увеличения не было сильного уменьшения атмосферного давления длительностью несколько суток, которое возникает при прохождении циклонов и может вызвать увеличение подпочвенного радона [Спивак и др., 2009; Фирстов, Рудаков, 2003; Nishimura, Katsura, 1990]. Отметим, что увеличение объемной активности радона с таким же временем проявления 2 октября зарегистрировано на глубине 1.5 м в 1.7 км от пункта «Карымшина» [Фирстов и др., 2015, рис. 8в].

Рис. 4 иллюстрирует происходившие 2 октября вариации атмосферного электрического поля, акустического давления, объемной активности эманаций, скорости ветра и атмосферного

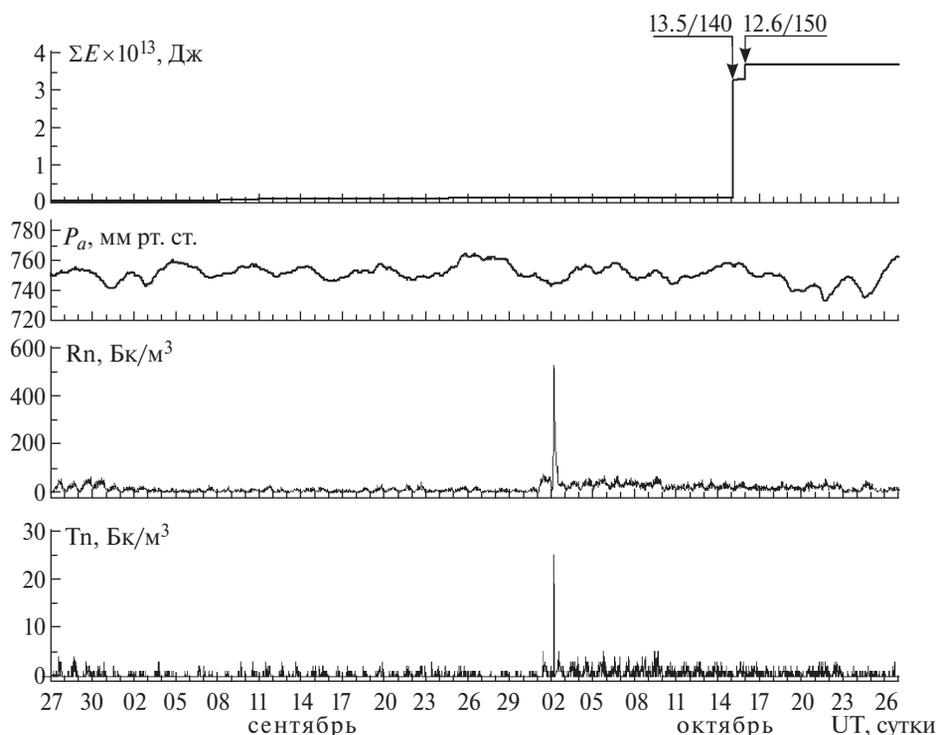


Рис. 3. График накопления энергии ΣE землетрясений с $K_s \geq 9.0$, произошедших в области выборки, вариации атмосферного давления P_a , объемной активности радона R_n и торона T_n во время эксперимента 2012 г.левой стрелкой отмечено главное землетрясение 15 октября, правой — его самый сильный афтершок. Первое число над стрелкой — K_s , второе — эпицентральное расстояние, км.

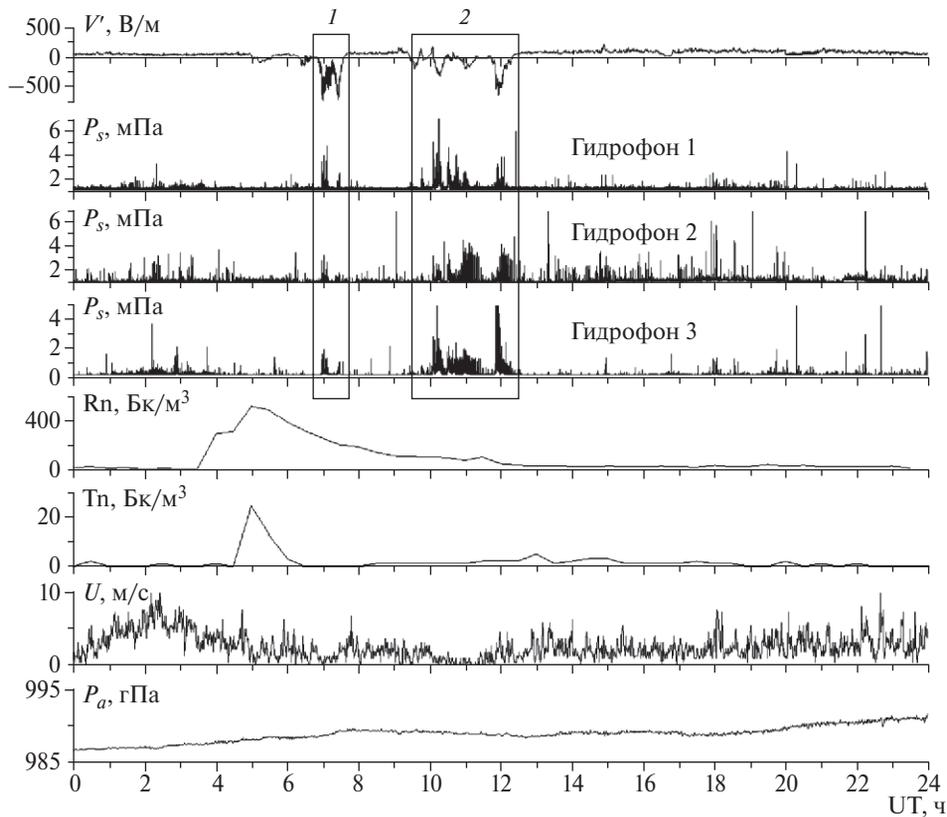


Рис. 4. Вариации градиента потенциала V' атмосферного электрического поля, акустического давления P_s на частотах 0.7–2.0 кГц в трех точках измерений, объемной активности радона Rn, торона Tn, скорости ветра U и атмосферного давления P_a 2 октября 2012 г. 1, 2 – фрагменты регистрации возмущений V' и P_s .

давления по данным метеостанции. Как видно на рис. 4, примерно через три часа после начала увеличения Rn, а затем Tn появились увеличения P_s во всех точках измерений и уменьшения V' с изменением знака. Они происходили в отсутствие дождя, сильного и умеренного ветра, при слабо меняющемся атмосферном давлении, что свидетельствует о не метеорологической природе этих возмущений. Во время эксперимента совместное увеличение радона, торона, акустического давления и уменьшение атмосферного электрического поля с изменением знака больше не наблюдалось.

На рис. 5, рис. 6 представлены развертки выделенных на рис. 4 двух фрагментов регистрации возмущений атмосферного электрического поля и акустического давления. Как видно на рис. 5, рис. 6, увеличения акустического давления в точках измерений происходили практически одновременно. Разные амплитуда и форма этих увеличений связаны, по-видимому, с неодинаковым откликом осадочных пород на деформацию, так как породы могут иметь возле гидрофонов разный дисперсный состав.

Увеличение радона и торона в ямке связано с повышением их содержания в газе поверхностного слоя грунта. Более сильное, чем фоновое, их поступление в ямку произойдет при увеличении скорости растяжения приповерхностных осадочных пород, которое, вероятно, было после накопления в ямке. Этим можно объяснить появление увеличений P_s после увеличения Rn и Tn (рис. 4). Отсутствие повышенных значений Rn и Tn во время увеличений P_s связано, по-видимому, с уже реализованным максимальным эманированием осадочных пород при растяжении.

Радон и торон мало различаются физико-химически, за исключением периода полураспада, который равен, соответственно, 3.825 суток и 55.6 с. Из-за малого периода полураспада торон не может мигрировать далеко от места образования и его массоперенос имеет поверхностный характер. При поступлении в атмосферу он выходит из слоя почвы толщиной 6 см, при этом ее первые 2 см дают до 75% эманации [Guedalia et al., 1970]. Как видно на рис. 4, увеличение радона началось раньше торона. Радон мог поступать в ямку не только из поверхностного слоя

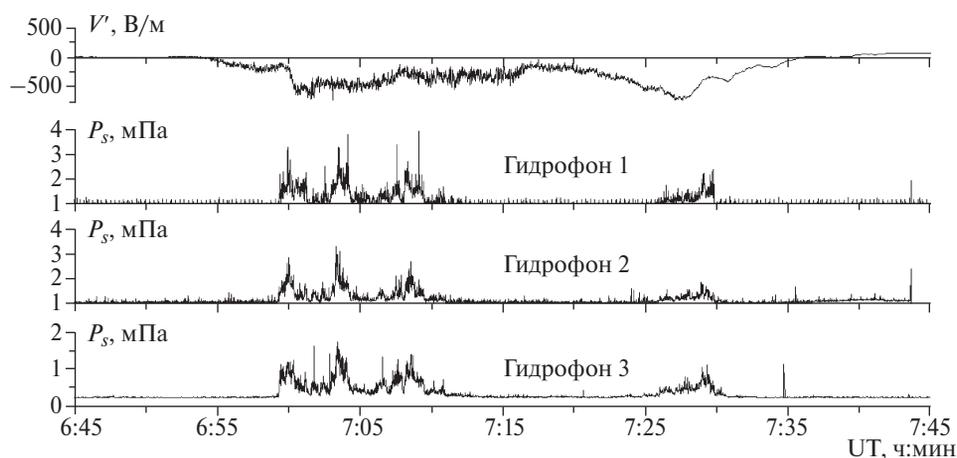


Рис. 5. Развертка выделенного на рис. 4 фрагмента 1 регистрации возмущений градиента потенциала V' атмосферного электрического поля и акустического давления P_s в трех точках измерений.

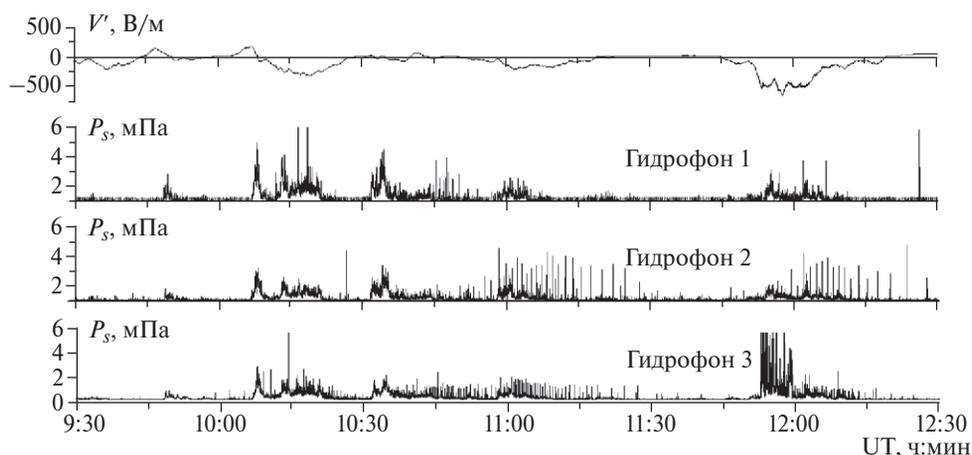


Рис. 6. Развертка выделенного на рис. 4 фрагмента 2 регистрации возмущений градиента потенциала V' атмосферного электрического поля и акустического давления P_s в трех точках измерений.

грунта, но и с большей глубины, так как большой период полураспада позволяет за время, равное трем–четырем периодам, подниматься путем диффузионного массопереноса с глубины до 10–12 м [Абдувалиев и др., 1983].

Совместное аномальное возмущение геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля 2 октября наблюдалось за 13 суток перед землетрясением с $K_s = 13.5$, произошедшим 15 октября в 01 ч 19 мин UTC в 140 км от пункта «Карымшина» [Руленко и др., 2016]. Координаты эпицентра 51.900° с. ш., 159.379° в. д., глубина очага 21 км, моментная магнитуда $M_w = 5.6$ (National Earthquake Information Center, <http://earthquake.usgs.gov>). Это землетрясение хорошо отразилось на графике накопления сейсмической энергии как ее очень сильное приращение (рис. 3). Оно сопровождалось афтершоками, которые

происходили до конца наших измерений. Самый сильный афтершок был 15 октября в 22 ч 45 мин. Он имел $K_s = 12.6$, координаты эпицентра 51.810° с. ш., 159.519° в. д., глубину очага 35 км и заметно отразился на графике накопления сейсмической энергии (рис. 3). Другие афтершоки имели $K_s \leq 10.5$.

Следует отметить, что теоретический радиус зоны проявления предвестников по деформации земной поверхности $r = e^M$ (км) [Добровольский, 1991] для землетрясения 15 октября составляет 270 км и почти в 2 раза больше эпицентрального расстояния до пункта «Карымшина». Этот пункт находится в зоне пересечения разноранговых тектонических разломов [Апрелков, Ольшанская, 1989; Сережников, Зимин, 1976], а разломные зоны характеризуются повышенной тензочувствительностью различных полей и их более сильными вариациями [Спивак, 2010], в том

числе атмосферного электрического поля [Моргунов и др., 1990], и более сильными возмущениями различных полей перед землетрясениями [Киссин, 2015].

Совместное аномальное возмущение геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля 2 октября можно рассматривать как комплексный отклик на изменение напряженно-деформированного состояния осадочных пород в пункте «Карымшина» при наступлении активной стадии подготовки землетрясения 15 октября. С позиции такого представления сейсмогенная природа этого возмущения, по мнению авторов, вполне возможна.

Аномальное увеличение радона и торона длительностью около 8 ч, зарегистрированное нами 2 октября за 13 суток перед землетрясением магнитудой $M_w = 5.6$, $R = 140$ км, хорошо согласуется с результатами других исследователей. В работе [Рудаков, 2002] отмечено, что в зонах геодинамической активности наблюдаются краткосрочные аномальные выбросы радона и торона в подпочвенный воздух и приземный слой атмосферы, которые могут на несколько порядков превышать фоновый уровень. В зоне активного разлома на Тайване зарегистрированы одновременные увеличения радона и торона в почвенном газе [Yang et al., 2005]. Они

возникали обычно за 1–20 суток перед землетрясениями магнитудой $M_L \geq 4.5$, $R < 150$ км и имели наименьшую длительность 5–7 ч.

Эксперимент 2013 г. На рис. 7 (как на рис. 3) представлены график накопления энергии рассматриваемых землетрясений, вариации атмосферного давления и объемной активности эманаций во время этого эксперимента, который длился 92 суток. За период измерений не было увеличения радона, торона и близкого во времени увеличения геоакустической эмиссии, и уменьшения атмосферного электрического поля с изменением знака при спокойной погоде. Увеличения эманаций не было даже 15–17 сентября, когда наблюдалось самое сильное, до 721 мм. рт. ст., уменьшение атмосферного давления, вызванное глубоким циклоном. Очевидно, что это должно быть связано с отсутствием радона и торона в газе поверхностного слоя грунта.

На графике накопления сейсмической энергии (рис. 7) отмечены ее наиболее сильные приращения, обусловленные локальными землетрясениями с $K_s > 12.0$. Таких землетрясений было три, их энергетические классы отмечены на этом графике. Эпицентры этих землетрясений, как и эпицентр землетрясения 15 октября 2012 г., находились у восточного побережья

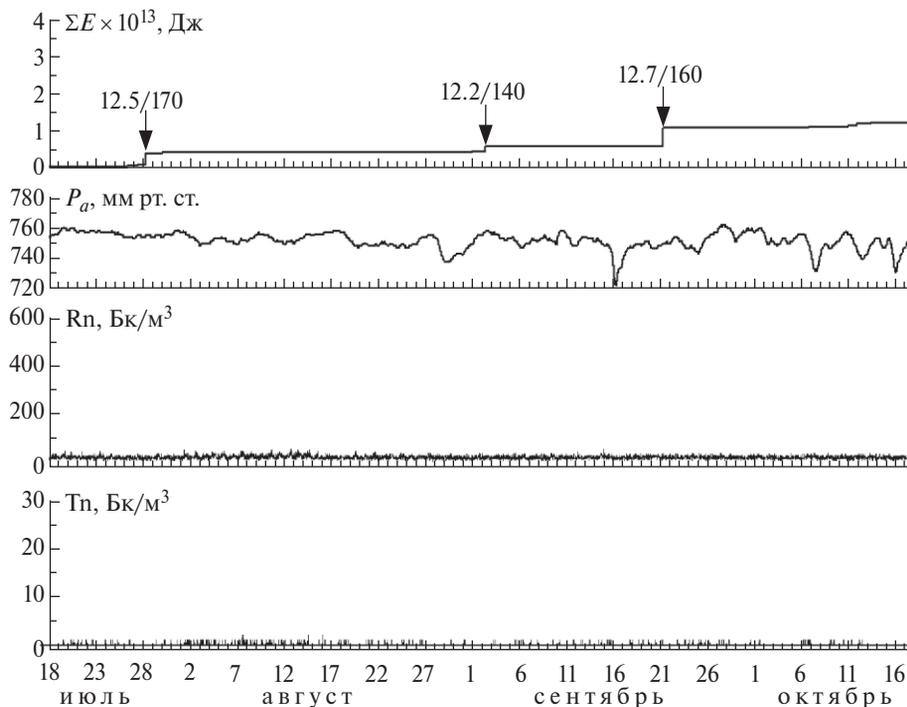


Рис. 7. График накопления энергии ΣE землетрясений с $K_s \geq 9.0$, произошедших в области выборки, вариации атмосферного давления P_a , объемной активности радона R_n и торона T_n во время эксперимента 2013 г. Стрелками отмечены землетрясения с $K_s > 12.0$. Числа над стрелками см. в подписи к рис. 3.

Южной Камчатки (рис. 2), но данные землетрясения были значительно слабее.

За время эксперимента 2012 г. энергия локальных землетрясений с $K_s \geq 9.0$ равна 3.6×10^{13} Дж и 87% энергии выделилось во время землетрясения 15 октября, перед которым зарегистрировано совместное аномальное возмущение геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля. За время эксперимента 2013 г. энергия таких землетрясений была в 3 раза меньше (1.2×10^{13} Дж) и она выделялась последовательно при более слабых землетрясениях. Учитывая это, можно предположить, что появление совместного возмущения геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля зависит от энергии локального землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность совместного возмущения геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля перед землетрясением. Предложена схема образования такого возмущения при наличии в пункте измерений приповерхностных осадочных пород и их растяжении.

Летом—осенью 2012–2013 гг. на Камчатке впервые проведены одновременные измерения геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля. Во время эксперимента 2012 г. за 13 суток перед землетрясением с магнитудой $M_W = 5.6$ на расстоянии 140 км от эпицентра зарегистрировано их совместное аномальное возмущение. Во время эксперимента 2013 г. происходили более слабые локальные землетрясения, и такого возмущения не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдувалиев А.К., Андреев В.К., Войтов Г.И., Сергеев Н.К.* Особенности хода во времени содержания радона в подпочвенной атмосфере в сейсмически активных зонах Западной Ферганы перед землетрясениями 18 X и 11 XII (Назарбекским) 1980 г. // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 1. С. 72–75.
- Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электрические и радиационные характеристики приземного слоя атмосферы на территории ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 1998. № 3. С. 3–9.
- 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.
- Адушкин В.В., Спивак А.А.* Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде // Физика Земли. 2012. № 3. С. 3–21.
- Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Шихова Н.М.* Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. LVI. № 11–12. С. 787–802.
- Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н.* Тектоническое районирование Центральной и Южной Камчатки по геологическим и геофизическим данным // Тихоокеанская геология. 1989. № 1. С. 53–66.
- Войтов Г.И.* Мониторинг радона атмосферы подпочв сейсмически активной Средней Азии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 27–38.
- Войтов Г.И., Гусев А.С., Козлова Н.С. и др.* Эманионные и электрические эффекты над сложно построенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны приразломных поднятий, Белоруссия) // Докл. РАН. 2000. Т. 370. № 1. С. 105–108.
- Гаррелс Р., Маккензи Ф.* Эволюция осадочных пород. М.: Мир. 1974. 272 с.
- Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР. 1991. 217 с.
- Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А. и др.* Деформационные и акустические предвестники землетрясений // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 1. С. 96–100.
- Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М.* Электричество облаков. Л.: Гидрометеиздат. 1971. 93 с.
- Киссин И.Г.* О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физика Земли. 2013. № 4. С. 145–160.
- Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука. 2015. 328 с.
- Косарев И.Б., Спивак А.А.* Взаимодействие эманионного поля радона и электрического поля на границе земная кора – атмосфера. Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС. 2012. С. 108–114.
- Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: изд-во ТРТУ. 1998. 123 с.
- 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 сеймотектоническом процессе // Докл. РАН. 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 // Докл. РАН. 2011. Т. 440. № 3. С. 403–406.
- Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М.* Мезомасштабная акустическая эмиссия. Владивосток: Дальнаука. 2012. 126 с.
- Моргунов В.А., Матвеев И.В., Статиев А.В.* Электричество атмосферы в зоне тектонического разлома // Магнитосферные исследования. 1990. № 15. С. 65–68.
- Моргунов В.А., Любашевский М.Н., Фабрициус В.З., Фабрициус З.Э.* Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 104–106.
- Морозов В.Н.* Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб.: РГГМУ. 2011. 253 с.
- Рудаков В.П.* Геодинамические процессы и их предвестники в вариациях полей радиоактивных эманаций // Геохимия. 2002. № 1. С. 56–62.
- Руленко О.П.* Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
- Руленко О.П.* Новая методика выявления и изучения предвестника землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. № 12. С. 42–47.
- Руленко О.П., Иванов А.В., Шумейко А.В.* Краткосрочный атмосферно-электрический предвестник камчатского землетрясения 6 III 1992, $M=6.1$ // Докл. РАН. 1992. Т. 326. № 6. С. 980–982.
- Руленко О.П., Широков В.А., Марапулец Ю.В. и др.* Отрицательные аномалии атмосферного электрического поля у поверхности земли на станции «Карымшина» в августе 2009 г. и их связь с активизацией планетарной сейсмичности. Сборник докладов V Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. 2010. С. 424–427.
- Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А.* Анализ проявления связи между высокочастотной геоакустической эмиссией и электрическим полем в атмосфере у поверхности земли // Вулканология и сейсмология. 2014. № 3. С. 53–64.
- Руленко О.П., Кузьмин Ю.Д.* Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 36–42.
- Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Кузьмин Ю.Д.* О причине одновременного появления возмущений атмосферного электрического поля и высокочастотной геоакустической эмиссии при сейсмотектоническом процессе // Докл. РАН. 2015. Т. 461. № 3. С. 333–337.
- Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Кузьмин Ю.Д., Солодчук А.А.* Совместное возмущение геоакустического, эманационного и атмосферного электрического полей у границы земная кора–атмосфера перед землетрясением // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2016. № 3 (14). С. 72–78.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука. 1991. 96 с.
- Серезжников А.И., Зимин В.М.* Геологическое строение Паратунского геотермального района, влияние отдельных геологических факторов на современную гидротермальную деятельность. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1976. С. 115–142.
- Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 192 с.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 313 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Спивак А.А.* Особенности геофизических полей в разломных зонах // Физика Земли. 2010. № 4. С. 55–66.
- Спивак А.А., Кожухов С.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А.* Эманация радона как индикатор интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе земная кора – атмосфера // Физика Земли. 2009. № 2. С. 34–48.
- Токтосопиев А.М.* Электромагнитные предвестники землетрясений. Каракол: Иссык-Кульский гос. университет. 2007. 312 с.
- Уткин В.И., Мамыров Э., Кан М.В. и др.* Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане // Физика Земли. 2006. № 9. С. 61–70.
- Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 2. С. 277–286.
- Фирстов П.П., Рудаков В.П.* Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26–41.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Акбашев Р.Р.* Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 60–80.
- Choudhury A., Guha A., Kumar De B., Roy R.* A statistical study on precursory effects of earthquakes observed through the atmospheric vertical electric field in northeast India // Annals of Geophysics. 2013. V. 56. № 3. P. 331–340.
- Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J.* A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. V. 476. P. 371–396.
- Gregori G.P., Poscolieri M., Paparo G. et al.* «Storms of crustal stress» and AE earthquake precursors // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. № 10. P. 319–337.
- Guedalia D., Laurent J-L., Fontan J. et al.* A study of radon 220 emanation from soils // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 2. P. 357–369.

- Hao J., Tang T., Li D. Progress in the research on atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes // *Journal of Earthquake Prediction Research*. 2000. V. 8. № 3. P. 241–255.
- Hoppel W.A. Theory of the electrode effect // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1967. V. 29. № 6. P. 709–721.
- Kachakhidze N., Kachakhidze M., Kereselidze Z., Ramishvili G. Specific variations of the atmospheric electric field potential gradient as a possible precursor of Caucasus earthquakes // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2009. V. 9. P. 1221–1226.
- Kamra A.K. Fair weather space charge distribution in the lowest 2 m of the atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. № C6. P. 4257–4263.
- Khera M.K., Raina B.N. Electrode effect at a mountain station // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1978. V. 40. № 12. P. 1297–1302.
- Kulkarni M., Kamra A.K. Vertical profiles of atmospheric electric parameters close to ground // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № D22. P. 28209–28221.
- Nikiforova N.N., Teisseyre K.P., Michnowski S., Kubicki M. On atmospheric electric field anomaly before the Carpathian earthquake of 30.08.1986 at the polish observatory Swider // *Proceeding of the 13 th International Conference on Atmospheric Electricity 2007*. Beijing, China. P. 37–40.
- Nishimura S., Katsura I. Radon in soil gas: applications in exploration and earthquake prediction // *Geochemistry of gaseous elements and compounds*. Athens: Theophrastus Publications. 1990. P. 497–533.
- Pawar S.D., Kamra A.K. Comparative measurements of the atmospheric electric space charge density made with the filtration and Faraday cage techniques // *Atmospheric Research*. 2000. V. 54. P. 105–116.
- Silva H.G., Bezzeghoud M., Reis A.H. et al. Atmospheric electrical field decrease during the $M=4.1$ Sousel earthquake (Portugal) // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. V. 11. P. 987–991.
- Virk H.S. Radon recording of Uttarkashi earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. № 8. P. 737–740.
- Yang T.F., Walia V., Chyi L.L. et al. Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan // *Radiation Measurements*. 2005. V. 40. P. 496–502.

Joint Perturbation in Geoacoustic Emission, Radon, Thoron, and Atmospheric Electric Field based on Observations in Kamchatka

O. P. Rulenko^{a,b,*}, Yu. V. Marapulets^{b,**}, Yu. D. Kuz'min^{c,***}, and A. A. Solodchuk^b

^a*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
683006 Petropavlovsk-Kamchatskii, Russia*

^b*Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch,
the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Kamchatka krai, 684034 Russia*

^c*Kamchatka Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

*e-mail: rulenko@kscnet.ru

**e-mail: marpl@ikir.ru

***e-mail: kuzy@emsd.ru

Received May 28, 2018

Based on the integration and analysis of the published theoretical results and field observations, the possibility is considered of a joint perturbation in geoacoustic emission, radon, thoron, and atmospheric electric field before an earthquake. A scheme is proposed for the formation of this perturbation in the presence of near-surface sedimentary rocks at the observation point and their extension. For detecting such a perturbation, simultaneous measurements of geoacoustic emission, radon, thoron, and atmospheric electric field have been carried out for the first time in Kamchatka in summer and autumn of 2012–2013, and a joint anomalous perturbation in these parameters was recorded.

Keywords: stretching of near-surface sedimentary rocks, geoacoustic emission, radon, thoron, atmospheric electric field, joint perturbation