

УДК 551.594.11:551.242.1

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ АНОМАЛИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ У ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

© 2024 г. О. П. Руленко*

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

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 20.10.2023 г.

Исследуются малоизученные отрицательные бухтообразные аномалии атмосферного электрического поля у земной поверхности, которые регистрируются в сейсмоактивных регионах при “хорошей” для атмосферно-электрических наблюдений погоде. Обобщены и проанализированы результаты наблюдений этих аномалий; выяснены особенности их проявления, свидетельствующие о связи с деформированием приповерхностных пород при тектоносейсмическом процессе. На основе представлений об атмосферном электричестве установлен источник, которым является локальный отрицательный объемный заряд легких ионов, возникающий в приземном воздухе при отрицательном вертикальном градиенте электропроводности. Выяснено, что этот заряд и порождаемые им отрицательные аномалии электрического поля имеют деформационно-эманационную природу. Предложена схема образования данных аномалий; рассмотрена роль радона и торона в их возникновении. Обнаружено, что торон играет в некоторых случаях более важную, чем радон, роль.

Ключевые слова: атмосферное электрическое поле, сейсмоактивный регион, отрицательная аномалия, источник, природа, образование

DOI: 10.31857/S0203030624010074, EDN: PSVMTN

ВВЕДЕНИЕ

В динамике атмосферного электрического поля (АЭП) у земной поверхности отражаются процессы, протекающие не только в атмосфере, но и в земной коре, о чем свидетельствуют его аномальные возмущения перед землетрясениями. Они регистрируются при “хорошей”¹ погоде на фоне суточной локальной вариации АЭП в отсутствии возмущений метеорологических величин. Среди этих возмущений АЭП наиболее часто регистрируются уменьшения с изменением знака, которые являются аномальными при такой погоде. Они имеют в целом бухтообразную

форму, осложненную более слабыми коротко-периодными вариациями. Такие отрицательные аномалии АЭП появляются обычно за 3–12 ч перед землетрясениями магнитудой $M > 3$ на расстоянии до 250–300 км от эпицентра и обнаружены в различных сейсмоактивных регионах (Средняя Азия, Северный Кавказ и Закавказье, Камчатка, Китай, Япония, Индия). Во время этих аномалий градиент потенциала АЭП уменьшается от среднего значения порядка +130 В/м до минус первых десятков–первых сотен и даже до минус 900–1000 В/м. Их длительность составляет обычно 0.3–4 ч, но может быть до 10 ч в ночное время [Иманкулов и др., 1990; Мищенко, 2016; Руленко, 2000; Смирнов, 2005; Смирнов и др., 2017; Токтосопиев, 2007; Choudhury et al., 2013; Hao, 1989; Hao et al., 1998, 2000; Kachakhidze et al., 2009; Nikiforova et al., 2007; Silva et al., 2011].

¹ Под “хорошей” погодой в атмосферном электричестве считаются такие погодные условия в пункте наблюдений [Семенов, 1982], при которых действие локальных объемных зарядов, вызванных возмущениями метеорологических величин, незначительно.

Кроме этих отрицательных аномалий АЭП обнаружены отрицательные бухтообразные вариации АЭП в периоды сильных удаленных до 10000–12000 км землетрясений [Рябова, Спивак, 2021]. Но они имеют малую амплитуду (20–130 В/м), небольшую длительность (15–65 мин) и не содержат изменение знака.

Важно отметить, что граница земная кора – атмосфера, где возникают отрицательные аномалии АЭП, характеризуется сильными изменениями свойств контактирующих сред, широким перечнем одновременно существующих разнородных полей, их взаимодействием и преобразованием. Обмениваясь различными субстанциями и энергией, на этой границе наиболее активно взаимодействуют твердая и газообразная геосферные оболочки [Адушкин, Спивак, 2012, 2014]. Составной частью взаимодействия является воздействие литосферы на атмосферу, которое проявляется, в частности, в аномальных изменениях перед землетрясениями геофизических полей в приземной атмосфере. Поэтому исследование отрицательных аномалий АЭП следует, по нашему мнению, отнести к одной из задач нового научного направления – Приповерхностная геофизика [Адушкин, Спивак, 2019] и рассматривать эти аномалии как результат воздействия геодинамических процессов в земной коре на электрическое состояние приземной атмосферы.

Возникающие в сейсмоактивных регионах отрицательные аномалии АЭП изучены слабо. Неясно, с каким фундаментальным геофизическим процессом они связаны, где (в земле или в атмосфере) находится источник, какова их природа, и как они образуются. Исследование этих вопросов имеет фундаментальное и прикладное значение. Оно актуально для изучения воздействия земной коры на приземную атмосферу в сейсмоактивных регионах и выяснения особенностей проявления этих аномалий перед землетрясениями с целью использования в комплексном сейсмическом прогнозе. Данные вопросы рассматриваются в настоящей работе.

СВЯЗЬ С ТЕКТОНОСЕЙСМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Отрицательные аномалии АЭП возникают перед локальными относительно пункта наблюдений землетрясениями, а также в их отсутствии вместе с увеличением высокочастотной

акустической эмиссии приповерхностных осадочных пород при усилении деформирования [Марапулец и др., 2010, 2011; Руленко и др., 2014]. По оценке [Руленко, 2003] предсейсмические отрицательные аномалии АЭП появляются внутри зоны, в которой находится эпицентр готовящегося землетрясения и ограниченной линией, где относительная деформация земной поверхности становится больше приливной ($>10^{-8}$), рассматриваемой как фоновая [Добровольский, 1991]. Как предвестники в других геофизических полях, которые следуют временным флуктуациям напряженно-деформируемого состояния пород [Соболев, Пономарев, 2003], эти аномалии могут возникать и исчезать перед землетрясением несколько раз [Иманкулов и др., 1990; Нао, 1989; Нао et al., 1998, 2000], появляться одновременно в двух [Иманкулов и др., 1990; Моргунов, 2000; Руленко и др., 1992] и трех [Нао, 1989] пунктах. Они могут регистрироваться независимо от направления на эпицентр землетрясения [Нао, 1989], быть с изменением знака в одном и без изменения в другом пункте перед одним и тем же землетрясением [Руленко и др., 1992; Токтосопиев, 2007].

Отрицательные аномалии АЭП зарегистрированы во время активизации мировой сейсмичности [Руленко и др., 2010], когда возникает перестройка тектонических напряжений планетарного масштаба и может усилиться деформирование пород в пункте “Карымшина” (52.83°N, 158.13°E). Этот пункт находится в области пересечения разноранговых тектонических разломов Южной Камчатки [Сережников, Зимин, 1976], а разломные зоны характеризуются повышенной тензочувствительностью различных полей и их более сильными вариациями [Спивак, 2010], в том числе АЭП у земной поверхности [Моргунов и др., 1990]. В этом пункте отрицательные аномалии АЭП зарегистрированы вместе с увеличением высокочастотной акустической эмиссии приповерхностных осадочных пород при деформации растяжения на два порядка больше приливной и отсутствии локальных землетрясений [Марапулец и др., 2011]. Эта деформация реальна, так как при небольших вариациях напряжений деформация пород усиливается в разломных зонах за счет нелинейных эффектов во много раз [Соболев, 1993].

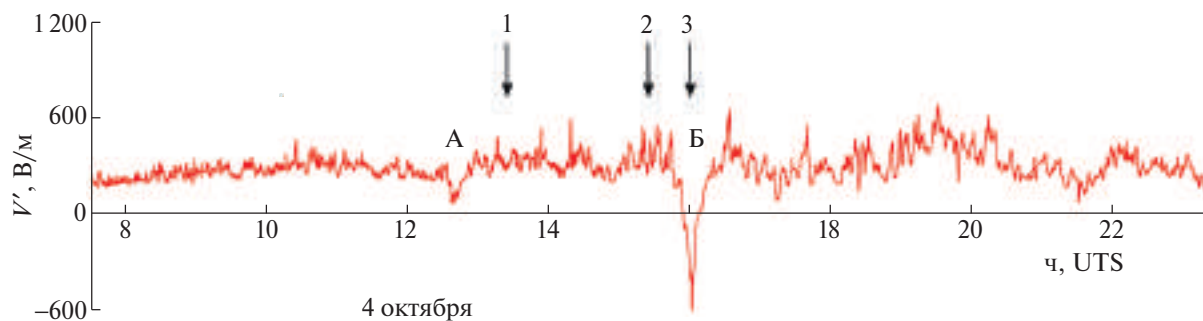


Рис. 1. Регистрограмма градиента потенциала V' атмосферного электрического поля во временной окрестности катастрофического Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г.

Стрелками отмечены: 1 — главный толчок магнитудой $M_w = 8.3$; 2, 3 — самые сильные за 4 октября афтершоки, $M_b = 6.3$ (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). А, Б — отрицательные бухтообразные аномалии градиента потенциала V' .

Можно ожидать, что отрицательные аномалии АЭП будут возникать не только до, но и после сильного землетрясения во время его сильных афтершоков, так как пред- и постсейсмические эффекты тесно связаны между собой и отражают изменения в геофизических полях, обусловленные деформациями пород на различных стадиях сейсмического процесса [Киссин, 2015]. Такой случай впервые наблюдался автором при катастрофическом Шикотанском землетрясении 4 октября 1994 г., $M_w = 8.3$. На рис. 1 представлена регистрограмма градиента потенциала V' атмосферного электрического поля во временной окрестности этого землетрясения, которое произошло в районе Южных Курильских островов в 13:22 UTC (5 октября в 01:22 камчатского времени) и сопровождалось сильными афтершоками (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). Регистрограмма получена в указанном выше пункте “Карымшина”², находящемся вдали от населенных пунктов и поселков.

По данным оператора-наблюдателя в рассматриваемый период времени стояла хорошая погода (отсутствовали облака и ветер, на ночном небе наблюдались звезды, температура воздуха была +8...+9°C). Поэтому влиянием метеорологических и техногенных факторов на поведение градиента потенциала V' можно пренебречь и

считать два бухтообразных уменьшения (А, Б) при такой погоде аномальными [Чалмерс, 1974].

Как видно на рис. 1, первая аномалия (А) появилась перед главным толчком и была без изменения знака; вторая аномалия (Б) с изменением знака начала проявляться через 2.3 ч после главного толчка во время двух самых сильных за 4 октября афтершоков. Длительность аномалий была около 0.3 и 0.7 ч соответственно. Учитывая коэффициент редукции, наименьшее значение градиента потенциала V' над плоской поверхностью земли (абсолютное значение) было во время второй аномалии минус 200 В/м.

Два указанных афтершока свидетельствуют о продолжении интенсивного выделения накопленной в очаговой области упругой энергии и дальнейшей перестройке напряжений регионального масштаба, которая, вероятно, вызвала усиление деформирования пород в тензочувствительном пункте “Карымшина”. Действительно, теоретический радиус зоны проявления предвестников по деформации земной поверхности $r = e^M$ (км) [Добровольский, 1991] равен 4000 км и значительно больше расстояния от эпицентра Шикотанского землетрясения до этого пункта в 1300 км. Поэтому возможно появление второй отрицательной аномалии V' в результате усиления деформирования пород.

Такие особенности проявления отрицательных аномалий АЭП свидетельствуют о связи

² Градиент потенциала V' измерялся при помощи электростатического флюксметра “Поле-2М” на высоте 2.9 м от поверхности земли, коэффициент редукции равен 0.33.

с деформированием приповерхностных пород при тектоносейсмическом процессе, который протекает постоянно в сейсмоактивных регионах и вызывает изменения напряженно-деформированного состояния пород земной коры. Сейсмический процесс является следствием большей, чем в асейсмичных регионах, скорости деформирования пород под действием тектонических сил [Садовский и др., 1987]. Используя термин “тектоносейсмический процесс”, предложенный в работе [Певнев, 1988], вместо более распространенного термина “сейсмотектонический процесс” можно с позиции единого процесса деформирования пород рассматривать возникновение отрицательных аномалий АЭП при усилении деформирования пород без появления локального землетрясения и усилении их деформирования в зоне подготовки такого землетрясения. В обоих случаях эти аномалии обусловлены одним фактором — накоплением и перераспределением в пункте наблюдений деформаций приповерхностных пород под действием тектонических сил. Поэтому, как возмущения других геофизических полей, они не всегда будут отражать процесс подготовки землетрясения и быть предвестником, для чего необходимо попадание пункта в зону подготовки и появление сейсмогенной деформации пород. Такая особенность проявления хорошо согласуется с известными в прогнозе землетрясений “ложными тревогами” — аномалиями различных полей, которые не сопровождаются сильным землетрясением и “пропусками целей” в виде отсутствия каких-либо аномалий перед сильным землетрясением.

Заметим, что поведение электростатического поля в воздухе вдоль очистного забоя угольных шахт тоже свидетельствует о связи с напряженным состоянием пород, а время релаксации этого поля соответствует времени механической релаксации массива пород [Черский и др., 1988].

Если бы отрицательные аномалии АЭП порождались процессом в очаге готовящегося землетрясения, то следовало бы ожидать зависимость их параметров (времени появления, амплитуды, длительности) от магнитуды землетрясения и эпицентрального расстояния, но это не наблюдается [Иманкулов и др., 1990; Руленко, 2001; Смирнов, 2005; Kachakhidze et al.,

2009]. В литературе нет сведений о появлении этих аномалий в момент землетрясения, что свидетельствует об отсутствии связи с разрывом сплошности пород в очаговой области, когда происходит их максимальное деформирование. Все это согласуется с мнением о том, что большинство аномалий геофизических полей порождаются не в очаге готовящегося землетрясения, а возникают при деформации пород в зоне подготовки [Добровольский, 1991; Соболев, Пономарев, 2003]. Поэтому отрицательные аномалии АЭП будут иметь локальный характер проявления, который обусловлен фрагментарным строением земной коры, особенно вблизи поверхности, и, как следствие, мозаичностью пространственно-временного деформирования пород. Локальное проявление этих аномалий перед землетрясениями обнаружено во время длительных наблюдений в нескольких пунктах в Китае [Нао, 1989].

С позиции связи отрицательных аномалий АЭП с тектоносейсмическим процессом можно объяснить результаты наблюдений на Камчатке [Смирнов, 2005], где из 103 случаев этих аномалий только после 37 из них произошли землетрясения. Остальные 66 случаев обусловлены, на наш взгляд, усилением деформирования пород в пункте наблюдений без появления локального землетрясения или с непопаданием пункта в зону подготовки такого землетрясения. С этой же позиции можно объяснить регистрацию на Камчатке [Мищенко, 2016] отрицательных аномалий АЭП только перед четырьмя из 16 землетрясений в одном пункте и перед пятью из 11 землетрясений — в другом. Можно объяснить также результаты [Choudhury et al., 2013], где только перед 10 из 32 землетрясений Индии зарегистрированы отрицательные аномалии АЭП, хотя при всех 32 землетрясениях была хорошая погода. Становятся понятны результаты [Kachakhidze et al., 2009], где эти аномалии зарегистрированы только перед 29 из 41 землетрясений Кавказа.

ДВЕ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НА НАХОЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКА АНОМАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ АЭП ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Существуют две точки зрения на нахождение источника аномальных возмущений АЭП

перед землетрясениями — в приповерхностных слоях земной коры и в приземном воздухе.

Источник в приповерхностных слоях земной коры

Возмущения АЭП объясняются появлением в области подготовки землетрясения крупномасштабного протяженного источника электрического тока, который может возникнуть при одновременном возбуждении в породах множества одинаково ориентированных локальных механоэлектрических преобразователей дислокационной или электрокинетической природы. Образование на концах такого источника нескомпенсированных электрических зарядов может индуцировать на земной поверхности заряд, который вызовет возмущение АЭП [Гохберг и др., 1982, 1985]. Подземный электрический ток и возмущения АЭП объясняются направленной диффузией точечных дефектов структуры в породообразующих минералах с ионным типом связи при наличии в них градиентов механических напряжений [Тарасов и др., 1990]. Появление вертикальной компоненты электрического поля в приповерхностных породах при изменении механических напряжений в очаге готовящегося землетрясения и ее возможное усиление в воздухе рассматриваются в работе [Алексеев, Аксенов, 2003]. В работе [Мальцев, Моргунов, 2005] обсуждается ансамбль элементарных электрических диполей, который может возникнуть в результате когерентной поляризации пород при деформации и создать макроскопическое электрическое поле, выходящее в атмосферу. Электрический ток, который может вынести на поверхность земли положительные заряды и создать в воздухе электрическое поле, способное проникнуть перед землетрясениями в ионосферу, рассматривается в работе [Kuo et al., 2011].

Отрицательные аномалии АЭП тоже связываются с механоэлектрическими процессами в приповерхностных слоях земной коры. Они объясняются токами электрокинетической природы, возникающими в результате диффузии поровой жидкости в породах при образовании микротрещин и увеличении пористости во время расширения [Hao et al., 1995]. В работе [Копейкин, 2011] теоретически показано, что при наличии подземной приповерхностной

неоднородности с повышенной проводимостью будет уменьшаться АЭП у земной поверхности. Однако этим результатом нельзя объяснить отрицательные аномалии АЭП. Во-первых, в геоэлектрике неизвестны такие неоднородности длительностью, как эти аномалии (несколько часов), во-вторых, здесь нет изменения знака АЭП.

Появлению источника аномальных возмущений АЭП в приповерхностных слоях земной коры препятствует большая удельная проводимость пород σ , которая составляет 10^{-6} – 10^{-2} и увеличивается во влагонасыщенных осадочных породах до 10^{-1} – 1 См/м [Электрические ..., 1984]. В результате, время релаксации электрического заряда $\tau = \epsilon \epsilon_0 / \sigma$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость пород, ϵ_0 — электрическая постоянная, составляет 10^{-9} – 10^{-4} с. Поэтому для компенсации очень быстрой релаксации разделяемых зарядов в указанных выше работах привлекается протяженный источник электрического тока, который может возникнуть в породах под действием “сторонних” механических сил. В случае отрицательных аномалий АЭП время действия такого источника должно соответствовать их длительности, а вводимый в рассмотрение сторонний ток, обусловленный ненулевой плотностью переносимого заряда, должен иметь бухтообразную временную форму, сохранять устойчивую ориентацию в породах и вызывать уменьшение АЭП с изменением знака. Все это маловероятно в условиях фрагментарного строения земной коры и сильной неоднородности механоэлектрических свойств пород, особенно вблизи поверхности. К тому же, разделение зарядов в земле создаст именно в ней электрическое поле, которое в атмосфере будет близко к нулю, а заряды быстро исчезнут из-за больших токов проводимости в окружающих породах.

Источник в приземном воздухе

Возмущения АЭП объясняются появлением медленно меняющейся ЭДС в результате инжекции заряженных аэрозолей почвенными газами, их турбулентного и конвективного переноса вверх и гравитационного оседания, что приведет к возникновению вертикального стороннего тока в атмосфере [Сорокин и др., 2001; Сорокин, Ружин, 2015]. Однако в настоящее

время нет данных о существовании потоков заряженных аэрозолей в атмосферу перед землетрясениями [Пулинец и др., 2015]. Такие аэрозоли могли бы возникнуть в присутствии продуктов распада радона и торона, которые являются изотопами тяжелых металлов и быстро захватываются в воздухе аэрозольными частицами [Юнге, 1964]. Но эти радиоактивные газы поступают из земли без продуктов распада [Юнге, 1964] и в капиллярах грунта нет условий для появления аэрозольных частиц.

С поступлением аэрозолей в атмосферу связываются отрицательные аномалии АЭП [Липеровский и др., 2007]. В качестве источника рассматривается “электрогравитационный аэрозольный генератор” ЭДС, который может возникнуть при резком выбросе над разломами облаков с крупными и мелкими аэрозолями, их однородной ионизации вносимым в начальный момент радоном, зарядении крупных аэрозолей отрицательно, а мелких — положительно и смещении первых относительно вторых под действием гравитации. В результате, ниже таких облаков может появиться электрическое поле обратной полярности. В этой модели генератора бухтообразных уменьшений АЭП с характерными временами 1–60 мин сделано несколько исходных предположений, реализация которых, тем более совместная, вызывает сомнение. В ней не рассматривается эффективность разделения крупных и мелких аэрозолей, для которой требуется большое различие их размеров, что происходит в дождевых облаках при выпадении осадков [Имянитов и др., 1971].

Небольшие по амплитуде отрицательные бухтообразные вариации АЭП без изменения знака, обнаруженные в периоды сильных удаленных землетрясений [Рябова, Спивак, 2021], могут быть обусловлены модулирующим воздействием внутренних атмосферных волн на приземный слой атмосферы, где в основном сконцентрированы радон и аэрозоль [Шалимов, Рябова, 2021].

Необычное объяснение сейсмоаномальных возмущений АЭП предложено в работе [Кузнецов, 2017]. Согласно этой работе, такие возмущения возникают в результате квантовой сцепленности протонов водных атмосферных комплексов с протонами водородных связей вещества литосферы. После установления

режима этой сцепленности следует декогеренция, во время которой происходит землетрясение и появляется возмущение АЭП. Такое объяснение возмущений АЭП является научной гипотезой и требует строгого экспериментального подтверждения.

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ АНОМАЛИИ АЭП НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ АТМОСФЕРНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Отрицательные аномалии АЭП возникают в приземном воздухе. Рассмотрим их на основе представлений об атмосферном электричестве, которые справедливы для асейсмичных и сейсмоактивных регионов. Такое рассмотрение ранее не проводилось.

Источник отрицательных аномалий АЭП

Средняя удельная проводимость приземного воздуха равна 10^{-14} См/м, что на 8–12 порядков меньше проводимости пород приповерхностных слоев земной коры. Поэтому время релаксации электрического заряда составляет около 15 мин и при продолжительной генерации позволяет длительно существовать в воздухе объемным зарядам различного происхождения. Как известно [Тамм, 1976], электрическое поле порождается электрическим зарядом, а поле совокупности зарядов равно сумме полей, создаваемых этими зарядами по отдельности (принцип суперпозиции электрических полей). При хорошей погоде динамика АЭП у земной поверхности определяется совокупностью процессов генерации и релаксации объемных электрических зарядов в районе пункта наблюдений. Порождаемые этими зарядами в широком диапазоне периодов вариации электрического поля накладываются на вариации поля глобального происхождения, обусловленного разностью потенциалов между нижней ионосферой и землей, и имеющего суточную изменчивость. Градиент потенциала этого поля положительный, а амплитуда и знак более короткопериодных вариаций определяются величиной и знаком локальных объемных электрических зарядов [Красногорская, 1972; Чалмерс, 1974].

Таким образом, при хорошей погоде уменьшение АЭП у земной поверхности связано

с появлением локального отрицательного объемного заряда, электрическое поле которого накладывается на электрическое поле глобального происхождения и происходит уменьшение наблюдаемого поля, в том числе с изменением знака [Dhanorkar et al., 1989; Kamra, 1982; Pawar, Kamra, 2000]. Возникновение и разрушение этого заряда вызовут отрицательную бухтообразную аномалию АЭП, которая будет содержать вариации, порождаемые другими локальными зарядами. Именно такую временную форму имеют отрицательные аномалии АЭП, наблюдаемые в сейсмоактивных регионах. В спектрах этих аномалий перед землетрясениями обнаружены вариации на периодах 0–200 с [Hao et al., 1995], которые можно объяснить появлением и разрушением в районе пункта наблюдений аэроэлектрических структур разного масштаба. Такие структуры возникают при хорошей погоде в результате турбулентного перемешивания и конвективного переноса аэроионов, заряженных аэрозолей и поступающих из грунта радона и торона, что формирует в целом распределение объемного заряда и напряженности электрического поля у земной поверхности [Анисимов, Мареев, 2000; Анисимов и др., 2013].

С позиции появления локального отрицательного объемного заряда становятся понятны предсейсмические отрицательные аномалии АЭП без изменения знака [Иманкулов и др., 1990; Руленко и др., 1992; Токтосопиев, 2007; Kondo, 1968], в том числе аномалия А на рис. 1. Они возникнут при небольшой величине этого заряда или на некотором удалении от него, что приведет к частичной компенсации электрического поля глобального происхождения. С этой же позиции можно объяснить длительные, до 10 ч в ночное время, отрицательные аномалии АЭП перед землетрясениями в Китае [Hao, 1989; Hao et al., 1995, 1998, 2000]. Их вызовет отрицательный объемный заряд, который может длительно существовать при устойчивой стратификации приземного слоя атмосферы в это время [Петрова и др., 2013].

Рассмотрим, как проявляется отрицательный объемный заряд в приземном воздухе. При хорошей погоде вследствие действия электродного эффекта в нем существует положительный объемный заряд. Однако иногда в

некотором слое, который находится на высоте от десятых долей метра до нескольких метров над землей, в условиях ослабленного перемешивания атмосферы при ее устойчивой стратификации возникает отрицательный заряд. Это явление известно в атмосферном электричестве как реверс электродного эффекта. Истории обнаружения отрицательного объемного заряда насчитывает около 100 лет [Куповых и др., 1998; Чалмерс, 1974; Kulkarni, Kamra, 2001]. Его средняя плотность может быть около -700 [Khera, Raina, 1978], а наибольшая может 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 объемного заряда (особенно ниже) будет уменьшаться нормальное атмосферное электрическое поле и изменяться знак, что наблюдается в действительности [Kamra, 1982; Pawar, Kamra, 2000].

По теоретическим расчетам [Куповых, 1996; Куповых и др., 1998] отрицательный объемный заряд возникает при скорости ветра меньше или равной 1 м/с. Согласно экспериментальным данным [Crozier, 1963, 1965; Pawar, Kamra, 2000], он исчезает при скорости ветра больше 1 м/с, то есть существует и в слаботурбулентном приземном воздухе. К разрушению этого заряда приводит усиление турбулентного перемешивания, электрического поля и конвективного переноса [Редин и др., 2013].

В отмеченных выше работах отрицательный объемный заряд исследовался в асейсмичных регионах, где поток тектонической энергии, скорость ее диссипации на различных уровнях иерархического ряда отдельностей земной коры и скорость деформирования пород под действием тектонических сил значительно меньше, чем в сейсмоактивных регионах [Садовский и др., 1987]. Перед землетрясением этот заряд, созданный легкими аэроионами, впервые обнаружен на Камчатке [Руленко, 2008]. Здесь же в указанном выше пункте “Карымшина” при одновременных измерениях АЭП на высоте 0.07 м и 3.6 м от земли в отсутствии локальных землетрясений зарегистрированы отрицательные аномалии АЭП с изменением знака только на высоте 0.07 м [Руленко и др., 2010], что

свидетельствует о появлении у земной поверхности отрицательного объемного заряда.

Деформационно-эманационная природа отрицательного объемного заряда и отрицательных аномалий АЭП

Появление при хорошей погоде отрицательного объемного заряда в приземном воздухе связано с радиоактивностью земли [Чалмерс, 1974]. В работе [Hoppel, 1967] теоретически показано, что этот заряд возникает при большой интенсивности ионообразования в воздухе. Образование отрицательного объемного заряда объясняется в работах [Морозов, 1991; Hoppel, 1967; Kulkarni, Kamra, 2001]. Среди всех аэроионов наибольшую подвижность имеют легкие ионы. Под действием электрического поля глобального происхождения отрицательные легкие ионы, подвижность которых на 30–40% больше, чем положительных, движутся из области повышенной ионизации вверх, а положительные ионы – вниз. Возникает ситуация, когда электрическое поле не успевает уносить вверх отрицательные ионы и они накапливаются в некотором слое воздуха.

Выясним, с участием какой физической субстанции деформация приповерхностных пород может влиять на интенсивность ионообразования в приземном воздухе.

В горных породах содержатся долгоживущие материнские элементы ^{238}U , ^{232}Th и ^{235}U , радиоактивные превращения которых имеют ряд промежуточных продуктов распада. В состав каждого ряда входит элемент, который является химически инертным газом и называется эманацией – радоном (^{222}Rn), тороном (^{220}Rn) и актиноном (^{219}Rn) соответственно. От места образования эманации мигрируют к земной поверхности, диффундируют повсеместно в атмосферу, вместе с продуктами распада ионизируют воздух, вызывая увеличение электропроводности и изменение электрических характеристик [Брикар, 1969; Красногорская, 1972; Чалмерс, 1974; Юнге, 1965]. В отличие от всех других химических элементов земной коры эманации являются единственными радиоактивными газами, которые поступают в атмосферу. При их отсутствии все радиоактивные превращения происходили бы в породах, и была бы невозможна ионизация воздуха

под действием процессов в земной коре [Израэль, 1964]. Она обусловлена широким распространением ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U и непрерывной генерацией эманаций, поступление которых в атмосферу является составной частью “газового дыхания Земли” по В.И. Вернадскому. Из-за малого периода полураспада актинона (4.0 с) его влиянием на электричество приземного воздуха можно пренебречь [Брикар, 1969; Красногорская, 1972].

В активных тектонических зонах наблюдаются краткосрочные аномальные выбросы радона и торона в подпочвенный газ и приземный слой атмосферы, которые могут на несколько порядков превышать фоновый уровень [Рудаков, 2002]. Перед землетрясениями объемная активность этих эманаций, пропорциональная концентрации их молекул, увеличивается в подпочвенном, почвенном газе и в приземном воздухе [Руленко, Кузьмин, 2015; Руленко и др., 2019; Уткин и др., 2006; Goto et al., 2017; Yang et al., 2005]. Увеличение активности в этом газе сопровождается отрицательными аномалиями АЭП и возмущениями высокочастотной акустической эмиссии приповерхностных осадочных пород [Руленко и др., 2015]. Перед сильным землетрясением в Японии 17 января 1995 г., $M_w = 6.9$ четыре случая увеличения радона в воздухе были при деформации земной поверхности 10^{-8} – 10^{-6} [Yasuoka et al., 2009], что согласуется с оценкой ее значений $>10^{-8}$, при которых появляются отрицательные аномалии АЭП перед землетрясениями [Руленко, 2003]. Уменьшение АЭП у земной поверхности наблюдается в асейсмичном регионе при увеличении подпочвенного радона [Косарев, Спивак, 2012] и радона вместе с тороном в приземном воздухе [Адушкин и др., 1998]. В таком же регионе обнаружена связь вариаций плотности объемного заряда легких аэроионов с вариациями объемной активности подпочвенного радона [Анисимов и др., 2013]. Все это вместе служит дополнительным подтверждением связи отрицательных аномалий АЭП с поступлением эманаций в атмосферу, которая имеет, вероятно, глобальный характер.

Отметим, что возмущения радона в подпочвенном и почвенном газе перед землетрясениями исследованы лучше, чем возмущения торона. Они зарегистрированы в различных

Таблица 1. Период полураспада эманации τ , характер излучения, энергия испускаемых α -частиц E_α и их пробег в воздухе l при нормальном атмосферном давлении [Баранов, Титаева, 1973]

Эманация	τ	Характер излучения	E_α , МэВ	l , см
Радон	3.825 сут	α	5.482	4.036
Торон	55.0 с	α	6.278	4.982

сейсмоактивных регионах [Фирстов, Макаров, 2015; Cicerone, et al., 2009], а при измерениях в двух и трех пунктах [Рудаков, 2005; Фирстов, Макаров, 2015; Walia et al., 2013] может наблюдаться разный характер возмущений и их отсутствие. Такая же особенность проявления свойственна предсейсмическим отрицательным аномалиям АЭП.

РОЛЬ РАДОНА И ТОРОНА В ВОЗНИКНОВЕНИИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ АЭП У ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Радон и торон, за исключением периода полураспада, мало различаются физико-химическими свойствами и обе эманации тяжелее воздуха в 7.5 раз. После выхода из капилляров грунта они ведут себя как пассивная газовая примесь и участвуют в атмосферном перемешивании. Из-за большого периода полураспада расстояние, которое может пройти радон в результате диффузии, конвекции или адвективного переноса, намного больше, чем расстояние, которое может пройти торон. Благодаря турбулентной диффузии и конвекции, радон поднимается до 9–12 км [Васильев и др., 1977; Юнге, 1965; Kritz et al., 1998; Machta, Lucas, 1962] и является основным эманационным ионизатором тропосферы. Торон присутствует только возле земли. В зависимости от метеорологических условий он регистрируется на высоте до 8 м [Israel, 1966], 15 м [Druilhet et al., 1972] и даже 30 м [Fontan et al., 1966], а его концентрация у земной поверхности может быть близкой и больше концентрации радона [Butterweck et al., 1994; Fontan et al., 1966; Israel, Israel, 1966; Israelsson et al., 1973]. По наблюдениям [Анисимов и др., 2019], объемная активность торона в подпочвенном газе и на высоте 5 см от земли была того же порядка, как и радона, что подтверждает, по мнению авторов, необходимость учета ионизирующего воздействия торона при изучении электричества приземного воздуха.

Согласно исследованиям [Анисимов и др., 2017], вклад торона в ионизацию воздуха у земной поверхности может быть сравнимым или превышать вклад радона вместе с дочерними продуктами.

Главную роль в ионизации воздуха находящимися в нем радиоактивными веществами играют α -частицы, которые служат основным фактором, определяющим его электропроводность [Брикар, 1969; Чалмерс, 1974]. Радон и торон являются мощными α -излучателями и выделяются из грунта без продуктов распада [Юнге, 1964]. Некоторые характеристики этих эманаций приведены в табл. 1.

Оценим отношение интенсивности ионообразования в воздухе тороном q_t к интенсивности ионообразования радоном q_r при поступлении в атмосферу. Применим выражение:

$$q = \frac{EQ}{w\tau}, \quad (1)$$

которое используется в работах [Анисимов и др., 2017; Морозов, 2011] при рассмотрении интенсивности ионообразования в воздухе α -частицами эманаций. Здесь E – энергия α -частиц; Q – концентрация эманации; w – средняя энергия, необходимая для образования одной пары ионов из молекул воздуха; τ – период полураспада эманации. При одинаковой концентрации торона и радона $q_t/q_r \approx 6900$, то есть интенсивность ионообразования тороном намного больше, чем радоном. Для одинаковой интенсивности ионообразования концентрация торона должна быть примерно в 6900 раз меньше, чем радона. Это связано с малым периодом полураспада торона и большей энергией испускаемых α -частиц, так как полная ионизация воздуха α -частицей пропорциональна ее энергии, которая обуславливает большую длину пробега α -частиц торона (см. табл. 1). Отметим, что первые продукты распада торона и радона (^{216}Po и ^{218}Po) являются тоже мощными α -излучателями

с большой энергией (5.996 МэВ) испускаемых α -частиц [Баранов, Титаева, 1973].

По современным представлениям, при хорошей погоде объемный электрический заряд формируется в приземном воздухе следующим образом. Основной вклад в вертикальный ток проводимости $j_\lambda = E\lambda$, который определяет эффект глобальной электрической цепи, вносят легкие ионы, так как они более чем на 95% обуславливают проводимость атмосферы [Кашлева, 2008]. Здесь j_λ и E — вектор плотности тока проводимости и напряженности электрического поля, λ — удельная электропроводность воздуха. Для плотности объемного заряда этих ионов ρ в квазистационарных условиях на основании уравнения Пуассона можно записать [Петрова и др., 2013, 2018; Kulkarni, 2010]:

$$\rho = \frac{\varepsilon_0}{\lambda} \nabla \cdot j_\lambda - \frac{\varepsilon_0}{\lambda^2} j_\lambda \cdot \nabla \lambda, \quad (2)$$

где ε_0 — электрическая постоянная, ∇ — оператор Гамильтона. В проекции на вертикальную ось z имеем:

$$\rho(z) = \frac{\varepsilon_0}{\lambda} \frac{\partial j_z}{\partial z} - \frac{\varepsilon_0}{\lambda(z)^2} j_z \frac{\partial \lambda}{\partial z}. \quad (3)$$

Согласно уравнению (3), плотность и знак объемного заряда легких ионов определяются на каждой высоте соотношением продуктивности электродного эффекта, формирующего положительный объемный заряд у земной поверхности (первый член), и процесса накопления объемного заряда, обусловленного прохождением тока проводимости в условиях меняющейся с высотой удельной электропроводности воздуха (второй член). Для горизонтально-однородной атмосферы в случае ненарушенного электрического поля вектор тока проводимости направлен вниз, а его проекция на вертикальную ось, направленную вверх, отрицательна и перед вторым членом правой части уравнения (3) будет знак плюс. Однако при уменьшении электропроводности с высотой ($\partial\lambda/\partial z < 0$) проекция ее градиента на эту ось отрицательна и перед вторым членом правой части уравнения (3) сохранится знак минус, что свидетельствует об отрицательном знаке формирующегося в этом случае объемного заряда. Второй член правой части уравнения (3), который поясняет условие возникновения отрицательного объемного заряда в воздухе, рассматривается

также в работах [Брикар, 1969; Морозов, 1991; Чалмерс, 1974].

Уменьшение электропроводности воздуха с высотой появится при отрицательном вертикальном градиенте интенсивности ионообразования, который возникнет при отрицательном вертикальном градиенте концентрации радона и торона. Из-за малого периода полураспада концентрация торона быстро уменьшается с высотой [Druilhet et al., 1972; Ikebe, Shimo, 1972; Israel, 1966]. Ночью при слабом ветре она была на высоте 0.5 м и 1 м от поверхности земли до 75 и 150 раз меньше, чем максимальная концентрация на уровне земли [Crozier, Biles, 1966]. При одновременных измерениях радона и торона до высоты 3 м от земли [Israelsson et al., 1973] отрицательный вертикальный градиент концентрации торона был значительно больше, чем радона ночью и в солнечные дни, несмотря на турбулентное перемешивание воздуха и развитую конвекцию в такие дни. Более сильный отрицательный вертикальный градиент концентрации торона, чем радона, наблюдался при слабом и более сильном турбулентном перемешивании воздуха [Butterweck et al., 1994].

Таким образом, торону свойственны более сильная, чем радону, интенсивность ионообразования в воздухе и более сильный отрицательный вертикальный градиент концентрации у земной поверхности, который обуславливает более сильный отрицательный вертикальный градиент электропроводности воздуха. Поэтому торон будет играть в некоторых случаях более важную роль в возникновении отрицательного объемного заряда и отрицательных аномалий АЭП. Это случится при одинаковой плотности потока эманаций в атмосферу, которая появится при одинаковом содержании ^{232}Th и ^{238}U в частицах грунта и одинаковом эманировании по торону и радону во время деформации в пункте наблюдений. Такая же роль торона будет при одинаковой стратификации приземной атмосферы, когда происходит одинаковый вертикальный перенос эманаций в воздухе. Для выяснения других подобных случаев требуется отдельное исследование.

Уместно отметить, что из-за малого периода полураспада поведение торона в подпочвенном газе перед землетрясением лучше, чем радона, следовало за изменениями деформации

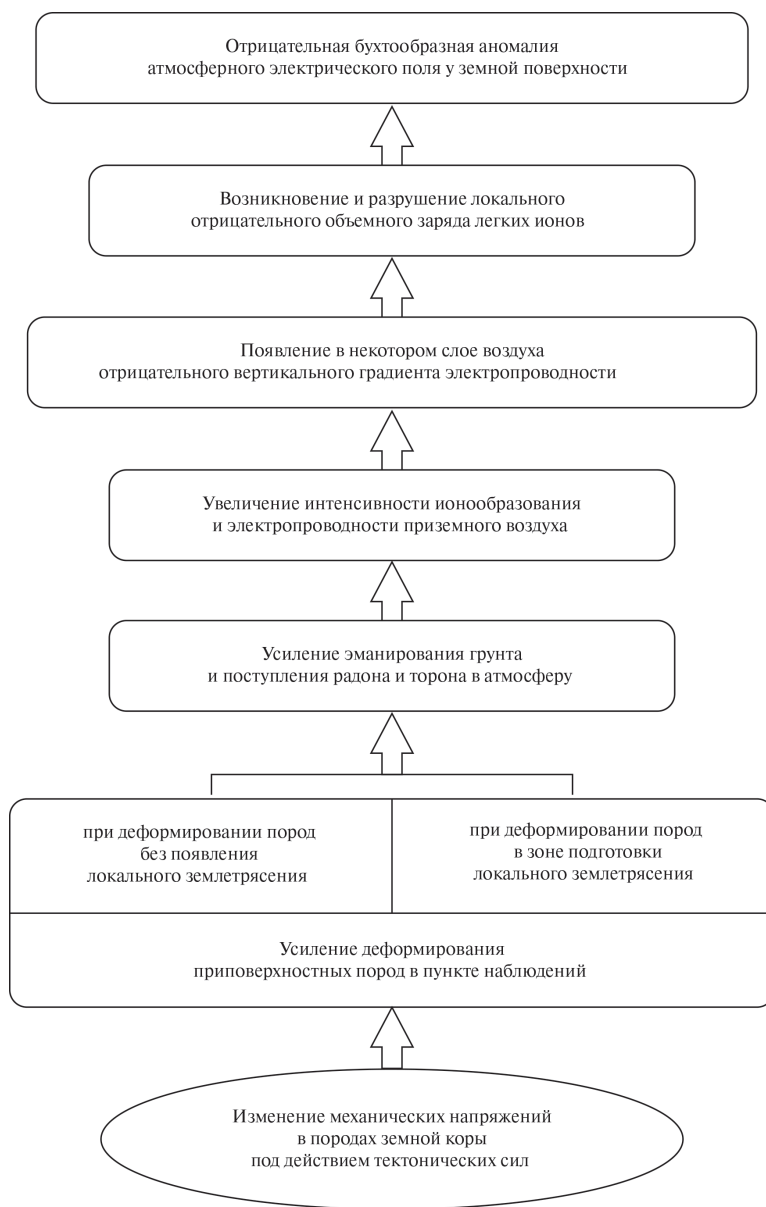


Рис. 2. Схема образования отрицательных бухтообразных аномалий атмосферного электрического поля у земной поверхности в сейсмоактивных регионах при “хорошей” для атмосферно-электрических наблюдений погоде.

приповерхностных пород [Уткин и др., 2006]. Поэтому регистрация торона может дать полезную информацию о динамике деформирования этих пород и отклике электрического состояния приземного воздуха в пункте наблюдений.

Суммируя полученные результаты, можно предложить схему образования отрицательных бухтообразных аномалий АЭП у земной поверхности в сейсмоактивных регионах при “хорошей” для атмосферно-электрических наблюдений погоде (рис. 2). Эти аномалии возникают при последовательном возмущении деформационного, эманационного и

аэроэлектрического полей у границы земная кора – атмосфера. Возмущение каждого из них имеет источник в возмущении предыдущего и является источником возмущения последующего. У каждого возмущения есть свои особенности генезиса, но все они порождены изначально изменением механических напряжений в породах земной коры под действием тектонических сил. Изменение этих напряжений вызывает усиление деформирования приповерхностных пород в пункте наблюдений, которое возникает при деформировании пород без появления локального землетрясения

(первый случай) и при деформировании в зоне подготовки такого землетрясения (второй случай). В обоих случаях усиливается эманирование грунта и поступление радона и торона в атмосферу, что приводит к увеличению интенсивности ионообразования и электропроводности приземного воздуха. При появлении в его некотором слое отрицательного вертикального градиента электропроводности возникает локальный отрицательный объемный заряд легких ионов. Возникновение и разрушение этого заряда порождают отрицательную бухтообразную аномалию АЭП, имеющую, как заряд, деформационно-эманационную природу. Таким образом, через ионизацию приземного воздуха радоном и торонам механическая энергия деформации приповерхностных пород преобразуется в энергию электрического поля в этом воздухе.

Реализацией первого случая можно объяснить возникновение отрицательных аномалий АЭП в сейсмоактивных регионах в отсутствии локальных землетрясений, и возникновение этих аномалий в асейсмичных регионах. При реализации второго случая отрицательную аномалию АЭП можно рассматривать как предвестник землетрясения.

Обращает внимание тот факт, что сейсмические волны землетрясений вызывают интенсивную деформацию пород, которая сопровождается различными косейсмическими эффектами [Киссин, 2015]. Скорость деформации в сейсмической волне от слабых близких землетрясений оценивается как 10^{-7} – 10^{-5} с⁻¹ [Моргунов, Матвеев, 1991], что на 5–7 порядков больше скорости тектонической деформации пород 10^{-14} – 10^{-10} с⁻¹ [Соболев, 1993]. Однако нет сведений о появлении рассматриваемых отрицательных аномалий АЭП при прохождении сейсмических волн в пункте наблюдений. Это, вероятно, связано с тем, что для реализации всей последовательности возмущений деформационного, эманационного и аэроэлектрического полей требуется значительное время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщены и проанализированы известные в мировой научной литературе результаты наблюдений малоизученных отрицательных бухтообразных аномалий атмосферного

электрического поля у земной поверхности, которые регистрируются в сейсмоактивных регионах при “хорошей” для атмосферно-электрических наблюдений погоде. Выявлены особенности проявления этих аномалий, свидетельствующие о связи с деформированием приповерхностных пород при тектоносейсмическом процессе. Впервые зарегистрирована постсейсмическая отрицательная бухтообразная аномалия атмосферного электрического поля.

Рассмотрены две существующие точки зрения на нахождение источника аномальных возмущений атмосферного электрического поля перед землетрясениями — в приповерхностных слоях земной коры и в приземном воздухе. Показано, что источник отрицательных аномалий этого поля не может быть в приповерхностных слоях земной коры. На основе представлений об атмосферном электричестве, которые справедливы для асейсмичных и сейсмоактивных регионов, установлено, что их источником является локальный отрицательный объемный заряд легких ионов, возникающий в приземном воздухе при отрицательном вертикальном градиенте электропроводности. Этот заряд и порождаемые им отрицательные аномалии электрического поля имеют деформационно-эманационную природу.

Наблюдаемые в сейсмоактивных регионах отрицательные аномалии атмосферного электрического поля являются откликом электрического состояния приземной атмосферы на деформирование приповерхностных пород при тектоносейсмическом процессе. Они возникают в результате преобразования через ионизацию воздуха радоном и торонам механической энергии деформации пород в энергию электрического поля в воздухе. Исследование этих аномалий следует отнести к одной из задач нового научного направления “Приповерхностная геофизика”.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор признателен доктору геол.-мин. наук А.И. Кожурину за обсуждение работы и полезные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде // Физика Земли. 2012. № 3. С. 3–21.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Проблемы взаимодействия геосфер и физических полей в приповерхностной геофизике // Физика Земли. 2019. № 1. С. 4–15.
- Алексеев А.С., Аксенов В.В. Об электрическом поле в очаговой зоне землетрясений // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 1. С. 106–110.
- Анисимов С.В., Мареев Е.А. Аэроэлектрические структуры в атмосфере // Докл. РАН. 2000. Т. 371. № 1. С. 101–104.
- Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Шихова Н.М. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Известия вузов. Радиофизика. 2013 Т. LVI. № 11/12. С. 787–802.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В. и др. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. 2017. № 1. С. 155–170.
- Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Козьмина А.С. Фооновая объемная активность радона и торона в почве и приземной атмосфере по наблюдениям сейсмической радоновой станции // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 4. С. 5–16.
- Баранов В.И., Титаева Н.А. Радиогеология. Изд-во МГУ, 1973. 243 с.
- Брикар Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества // Проблемы электричества атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. С. 68–105.
- Васильев А.С., Клочков Г.Н., Назаров Л.Е. Самолетный шлюзовой заборник аэрозолей. М.: Гидрометеиздат, 1977. С. 103–111. (Труды ИЭМ. Вып. 6(64))
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.П. Об источниках электромагнитных предвестников землетрясений // Электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1982. С. 39–55.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Гершензон Н.И., Пилипенко В.А. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры // Физика Земли. 1985. № 1. С. 72–87.
- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.
- Израэль Х. Естественная и искусственная радиоактивность атмосферы // Ядерная геофизика. М.: Мир, 1964. С. 125–151.
- Иманкулов А.Ч., Струминский В.И., Татаринцев С.П. Результаты наблюдений аномальных вариаций напряженности электрического поля атмосферы перед землетрясениями // Тезисы докладов: IV Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству. Нальчик, 1990. С. 34–35.
- Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М. Электричество облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 93 с.
- Кашлева Л.В. Атмосферное электричество. СПб.: РГГМУ, 2008. 116 с.
- Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 328 с.
- Копейкин В.В. Использование приземного электрического поля для обнаружения подземных неоднородностей // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 5. С. 690–694.
- Косарев И.Б., Спивак А.А. Взаимодействие эманационного поля радона и электрического поля на границе земная кора – атмосфера // Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС, 2012. С. 108–114.
- Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 323 с.
- Кузнецов В.В. О связи между землетрясением и атмосферным электричеством // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 2. Вып. 18. С. 99–110.
- Куповых Г.В. Возникновение отрицательного объемного заряда вблизи поверхности земли в высокогорных условиях // Труды ВГИ. 1996. Вып. 89. С. 73–80.
- Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
- Липеровский В.А., Михайлин В.В., Шевцов Б.М. и др. Об инфракрасном излучении в атмосфере перед землетрясениями // Геофизические исследования. 2007. Вып. 8. С. 51–68.
- Мальцев С.А., Моргунов В.А. К физической модели возмущений электростатического поля литосферной природы в атмосфере и ЭМИ // Физика Земли. 2005. № 9. С. 65–73.
- Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Мищенко М.А., Шевцов Б.М. Связь высокочастотной геоакустической эмиссии с электрическим полем в атмосфере при сейсмотектоническом 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.
- Мищенко М.А. Статистика возникновения предсейсмических аномалий в геоакустической эмиссии и атмосферном электрическом поле // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 3. Вып. 14. С. 47–52.
- 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., Матвеев И.В. Электрические и электромагнитные эффекты в эпицентральной зоне афтершоков Спитакского землетрясения // Физика Земли. 1991. № 11. С. 124–128.
- Моргунов В.А. Пространственные неоднородности электрического поля как фактор лито-ионосферных связей // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН, 2000. С. 106–113.
- Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 395–408.
- Морозов В.Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб.: РГГМУ, 2011. 253 с.
- Певнев А.К. Прогноз землетрясений – геодезические аспекты проблемы // Физика Земли. 1988. № 12. С. 88–98.
- Петрова Г.Г., Петров А.И., Панчишкина И.Н. Формирование электрической структуры нижних слоев атмосферы: экспериментальные исследования и обобщение данных // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. LVI. № 11/12. С. 803–819.
- Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Петров А.И. и др. Исследование роли аэрозолей в формировании вариаций электрического поля в приземной атмосфере // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 5. Вып. 25. С. 42–54.
- Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 4. С. 540–558.
- Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. LVI. № 11/12. С. 820–828.
- Рудаков В.П. Геодинамические процессы и их предвестники в вариациях полей радиоактивных эманаций // Геохимия. 2002. № 1. С. 56–62.
- Рудаков В.П. Сейсмоземанационные предвестники Алтайского 27 сентября 2003 г. землетрясения на Русской платформе (на территории Москвы) // Геохимия. 2005. № 1. С. 101–104.
- 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. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
- Руленко О.П. Некоторые особенности проявления аномалий электрического поля в приземной атмосфере перед землетрясениями // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 75–81.
- Руленко О.П. Тензочувствительность предсейсмических отрицательных аномалий электрического поля в приземном воздухе // Сб. научных трудов Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. Т. II. Владимир: Транзит ИКС, 2003. С. 82–85.
- 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., 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 // Сб. докладов V Международной конференции “Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений”, с. Паратунка, Камчатский край, 2–7 августа 2010 г. 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 геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 2019. № 5. С. 76–86.
- Рябова С.А., Спивак А.А. Вариации электрических характеристик приземной атмосферы при сильных землетрясениях. Результаты наблюдений // Физика Земли. 2021. № 4. С. 120–132.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 101 с.
- Семенов К.А. Хорошая погода и элементы атмосферного электричества // Труды ГГО. 1982. Вып. 455. С. 112–119.
- Серезникова 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.
- Смирнов С.Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45. № 2. С. 282–287.
- Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В. Эффекты сильных землетрясений в вариациях электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57. № 5. С. 656–663.
- 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.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М., Яценко А.К. Возмущение электрического поля в слое земля–ионосфера при инъекции заряженных аэрозолей // Геомагнетизм и аэрномия. 2001. Т. 41. № 2. С. 187–191.
- Сорокин В.М., Ружин Ю.Я. Электродинамическая модель процессов в атмосфере и ионосфере накануне землетрясения // Геомагнетизм и аэрномия. 2015. Т. 55. № 5. С. 641–658.
- Спивак А.А. Особенности геофизических полей в разломных зонах // Физика Земли. 2010. № 4. С. 55–66.
- Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 616 с.
- Тарасов Б.Г., Дырдин В.В., Иванов В.В. Геотектонические процессы и аномалии квазистационарного электрического поля в земной коре // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312. № 5. С. 1092–1095.
- Токтосопиев А.М. Электромагнитные предвестники землетрясений. Каракол: Иссык-Кульский гос. унив-т, 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.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 4. С. 58–80.
- Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 421 с.
- Черский Н.В., Дрындин В.А., Макогон Ю.Ф., Михина Т.В. Электростатические поля угольных пластов // Докл. АН СССР. 1988. Т. 299. № 4. С. 851–853.
- Шалимов С.Л., Рябова С.А. О возможном механизме вариаций электрического поля приземной атмосферы при сильных удаленных землетрясениях // Докл. РАН. 2021. Т. 499. № 2. С. 164–167.
- Электрические свойства минералов и горных пород // Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) / Справочник геофизика. М.: Недра, 1984. С. 148–188.
- Юнге Х.Э. Радиоактивные аэрозоли // Ядерная геофизика. М.: Мир, 1964. С. 253–298.
- Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 424 с.
- Butterweck G., Reineking A., Kesten J., Porstendorfer J. The use of the natural radioactive noble gases radon and thoron as tracers for the study of turbulent exchange in the atmospheric boundary layer – case study in and above a wheat field // Atmospheric Environment. 1994. V. 28. № 12. P. 1963–1969.
- Choudhury A., Guha A., De B.K., 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.
- Crozier W.D. Electrode effect during nighttime low-wind periods // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 11. P. 3451–3458.
- Crozier W.D. Atmospheric electrical profiles below three meters // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 12. P. 2785–2792.
- Crozier W.D., Biles N. Measurements of radon 220 (thoron) in the atmosphere below 50 centimeters // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. № 20. P. 4735–4741.

- Dhanorkar S.S., Deshpande C.G., Kamra A.K.* Observations of some atmospheric electrical parameters in the surface layer // *Atmospheric Environment*. 1989. V. 83. № 4. P. 839–841.
- Druilhet A., Guedalia D., Fontan J., Laurent J.L.* Study of radon 220 emanation deduced from measurement of vertical profile in the atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. № 33. P. 6508–6514.
- Fontan J., Birot A., Blanc D. et al.* Measurement of the diffusion of radon, thoron and their radioactive daughter products in the lower layers of the Earth's atmosphere // *Tellus*. 1966. V. XVIII. № 2. P. 623–632.
- Goto M., Yasuoka Y., Nagahama H. et al.* Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and after the 2011 northern Wakayama earthquake (Mj 5.5) // *Radiation Protection Dosimetry*. 2017. V. 174. № 3. P. 412–418.
- Hao J.G.* Near earth surface anomalies of the atmospheric electric field and earthquakes // *Acta Seismologica Sinica*. 1989. V. 2. № 2. P. 289–298.
- Hao J.G., Tang T.M., Li D.R.* A kind of information on short-term and imminent earthquake precursors – research on atmospheric electric field anomalies before earthquakes // *Acta Seismologica Sinica*. 1998. V. 11. № 1. P. 121–131.
- Hao J.G., Tang T., Li D.* Progress in the research on atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes // *J. of Earthquake Prediction Research*. 2000. V. 8. № 3. P. 241–255.
- Hao J-G., Zhang Y-F., Pan H-W. et al.* Ultra low frequency electromagnetic wave anomaly and its spectrum characteristics before earthquakes // *Acta Seismologica Sinica*. 1995. V. 8. № 1. P. 101–109.
- Hoppel W.A.* Theory of the electrode effect // *J. Atm. Terr. Phys.* 1967. V. 29. P. 709–721.
- Ikebe Y., Shimo M.* Estimation of the vertical turbulent diffusivity from thoron profiles // *Tellus*. 1972. V. XXIV. № 1. P. 29–37.
- Israel H., Israel G.W.* A new method of continuous measurements of radon (Rn^{222}) and thoron (Rn^{220}) in the atmosphere // *Tellus*. 1966. V. XVIII. № 2. P. 557–561.
- Israel G.W.* Meteorological influences on the thoron (Rn^{220}) content of the atmosphere // *Tellus*. 1966. V. XVIII. № 2. P. 633–637.
- Israelsson S., Knudsen E., Ungethum E.* Simultaneous measurements of radon (Rn^{222}) and thoron (Rn^{220}) in the atmospheric surface layer // *Tellus*. 1973. V. XXV. № 3. P. 281–290.
- 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.
- Kondo G.* The variation of the atmospheric electric field at the time of earthquake // *Kakioka Magnet. Observ. Mem.* 1968. V. 13. № 1. P. 11–23.
- Kritz M.A., Rosner S.W., Stockwell D.Z.* Validation of an off-line three-dimensional chemical transport model using observed radon profiles. 1. Observations // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D7. P. 8425–8432.
- Kulkarni M., Kamra A.K.* Vertical profiles of atmospheric electric parameters close to ground // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № D22. P. 28209–28221.
- Kulkarni M.N.* On the modeling of electrical boundary layer (electrode layer) and derivation of atmospheric electrical profiles, eddy diffusion coefficient and scales of electrode layer // *J. of Earth System Science*. 2010. V. 119. № 1. P. 75–86.
- Kuo C.L., Huba J.D., Joyce G., Lee L.C.* Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A10317. DOI: 10.1029/2011JA016628
- Machta L., Lucas H.F.* Radon in the upper atmosphere: Radon measurements near the equatorial and polar tropopause suggest the nature of atmospheric transport // *Science*. 1962. V. 135. P. 296–299.
- 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 13th International Conference on Atmospheric Electricity*. Beijing, China, 2007. P. 37–40.
- 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.
- Walia V., Yang T.F., Lin S-J. et al.* Temporal variation of soilgas compositions for earthquake surveillance in Taiwan // *Radiation Measurements*. 2013. V. 50. P. 154–159.
- 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.
- Yasuoka Y., Kawada Y., Nagahama H. et al.* Preseismic changes in atmospheric radon concentration and crustal strain // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2009. V. 34. P. 431–434.

Negative Anomalies in the Atmospheric Electric Field near the Earth's Surface in Seismically Active Regions

O. P. Rulenko*

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
e-mail: rulenko@kscnet.ru

The paper examines poorly-studied negative bay-like anomalies in the near-earth atmospheric electric field in seismically active regions at fair weather suitable for atmospheric electric observations. Observation data analysis revealed characteristic features of anomalies formation that allow us to conclude that the anomalies are associated with the deformation of near-surface rocks at tectonoseismic process. On the basis of the concept of atmospheric electricity, the source of anomalies in the electric field is a local negative space charge of small ions in the near-earth air emerged at a negative vertical gradient of electrical conductivity. It was revealed that the charge and produced negative anomalies in the electric field have deformation and emanation processes in their origin. We propose a scheme of anomalies formation and consider the role of radon and thoron in their emergence. It was found that thoron plays a more important role in some cases.

Keywords: atmospheric electric field, seismically active region, negative anomaly, source, nature, formation