

## Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса

К.Н. Пустовалов, П.М. Нагорский\*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 1.06.2016 г.

Исследованы вариации градиента потенциала приземного электрического поля в приземном слое атмосферы во время прохождения кучево-дождевых облаков (*Cumulonimbus*, *Cb*). Всего рассмотрено более 450 случаев. Предложена методика выделения структурных элементов вариаций градиента потенциала, обусловленных прохождением *Cb*, и проведена формализация вариаций, в ходе которой выявлены основные типы изменения градиента потенциала электрического поля. Для каждого из выделенных типов вариаций определены параметры, характеризующие вариации градиента потенциала в целом и его структурных элементов. Найдены связи между характерными особенностями выявленных типов вариаций градиента потенциала и *Cb* различного происхождения, находящихся на разных этапах своего развития.

*Ключевые слова:* атмосферное электричество, кучево-дождевые облака, ливневые осадки, грозы; atmospheric electricity, cumulonimbus, showers, thunderstorms.

### Введение

Согласно [1] глобальное потепление ведет к росту влажности и уменьшению статической устойчивости в атмосфере в регионах Северной Евразии, что может привести к интенсификации конвективных процессов. В [2] показано, что во второй половине XX в. – начале XXI в. отмечалось увеличение доли конвективных и снижение доли слоистообразных форм облачности, а дальнейшее потепление климата приведет к еще большему увеличению повторяемости кучево-дождевых облаков и связанных с ними опасных явлений (гроз, града, интенсивных ливней, смерчей). Однако до сих пор основным способом регистрации форм облачности с поверхности Земли остаются визуальные и радиолокационные наблюдения, обладающие рядом недостатков. Для визуальных наблюдений наибольшую сложность составляет выявление «затопленной конвекции» в облачных системах атмосферных фронтов, повторяемость которой при дальнейшем потеплении климата будет только возрастать. Таким образом, возникает необходимость в дополнительных источниках информации о текущем состоянии облачности.

Локальное электрическое поле приземной атмосферы весьма чувствительно к метеорологическим условиям и существенно изменяется под влиянием облачности, особенно конвективных форм, и различных атмосферных явлений [3–6].

Данная особенность может быть использована для решения обратной задачи – диагностирования и уточнения метеорологических условий на основе данных об электрических характеристиках приземного слоя атмосферы. Однако для решения такой задачи требуется накопление надежных сведений об особенностях влияния различных метеорологических факторов на приземное электрическое поле.

Полученные в [4, 5] статистические характеристики значений градиента потенциала, характерные для форм облачности нижнего яруса, показали, что появление нижней облачности в среднем приводит к уменьшению напряженности поля, характерной для условий «хорошей погоды». Наибольшие возмущения наблюдаются при кучево-дождевых облаках (*Cb*). По данным ряда станций, регистрирующих вариации градиента потенциала  $\nabla\varphi$  с временным тактом в 1 ч, метеорологические явления были ранжированы по степени искажения нормальных значений  $\nabla\varphi$ : максимальные ранги имеют ливневой дождь, гроза, град [5]. Выпадение осадков в виде дождя и мокрого снега приводит к уменьшению значений градиента потенциала и переходу их в область отрицательных значений, а снег и (или) метель – к увеличению значений  $\nabla\varphi$  [5, 6].

В работах [4, 7] описана формализация вариаций  $\nabla\varphi$  во время близкого относительно пункта регистрации прохождения гроз на территории Восточной Сибири, однако выделение отдельных типов осуществлялось визуально на основе небольшого количества случаев. В [3] предприняты попытки качественного объяснения изменения  $\nabla\varphi$  во время прохождения конвективных облаков как движения

\* Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru); Пётр Михайлович Нагорский (npm\_sta@mail.ru).

положительно-поляризованного вертикального диполя, имеющего различный наклон. В работах [6, 8] отражены модельные расчеты изменения  $\nabla\phi$  при прохождении кучево-дождевого облака, электрическая структура которого аппроксимирована положительно-поляризованным вертикальным диполем [8] и горизонтальным диполем в нижней части облака без учета заряда верхней его части [6]. В [9] проведен модельный расчет вариаций  $\nabla\phi$  под влиянием переносимых ветром объемных зарядов с простой конфигурацией (диполей).

Цель данного исследования заключается в выявлении наиболее распространенных типов «медленных» вариаций [4], связанных с прохождением кучево-дождевых облаков в теплый период года, и определении их основных характеристик. Анализировались вариации  $\nabla\phi$  у земной поверхности, обусловленные совместным воздействием объемных зарядов в облаках и в выпадающих осадках, а воздействие на вариации градиента потенциала близких молниевых разрядов не учитывалось.

## 1. Описание экспериментального материала

Измерения параметров атмосферного электричества проводились в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (г. Томск) с 2006 г. с использованием автоматизированной метеорологической информационно-измерительной системы (АМИИС). Данная система позволяет осуществлять мониторинг основных метеорологических и электрических параметров, а также ультрафиолетового излучения и естественной радиоактивности с временным разрешением 0,5–1 мин.

Градиент потенциала электрического поля приземной атмосферы измерялся электрическими флюксметрами «Поле-2» и «CS110», полярные электропроводности воздуха – прибором «Электропроводность-2». Метеорологические измерения проводились с помощью АМИИС и ультразвуковой метеостанции АМК-03 [10]. Для анализа синоптических условий использовались кольцевые карты погоды с фронтальным анализом (<http://gpu.math.tsu.ru/maps>). Характеристики облачного покрова определялись по данным спектрорадиометра MODIS (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>) в моменты пролета вблизи местного полудня спутников Aqua и Terra.

Анализ данных мониторинга градиента потенциала электрического поля показал, что при прохождении мощной конвективной облачности отмечаются интенсивные изменения как абсолютной величины, так и знака градиента потенциала [11]. При этом форма временной динамики  $\nabla\phi$  существенно отличалась при *Cb*, развивающихся в разных синоптических ситуациях и имеющих различную конфигурацию.

Например, при прохождении одиночного кучево-дождевого облака внутримассового происхождения, которому сопутствовали кучевые облака различной

мощности, в динамике  $\nabla\phi$  отмечались два последовательных возмущения различной полярности, общая длительность которых ~ 30 мин. Этот случай иллюстрируется рис. 1, а, на верхней панели которого представлено RGB-изображение спектрорадиометра MODIS, а на нижней – ход градиента потенциала. При перемещении в окрестностях пункта мониторинга целого поля *Cb* (рис. 1, б), развивающегося в зоне повышенной неустойчивости в тылу циклона, наблюдались сложные вариации  $\nabla\phi$ , продолжающиеся на протяжении нескольких часов.

Прохождение облачной системы холодного фронта иллюстрируется рис. 1, в. Представленная на этом рисунке мезомасштабная структура состоит из нескольких гряд кучево-дождевых облаков, включая «затопленные» в слоистообразной облачности конвективные ячейки, и характеризуется целой серией непродолжительных возмущений. Общая длительность возмущения составляет несколько часов. При перемещении в окрестностях пункта наблюдения *Cb* в составе мезомасштабного конвективного комплекса (МКК) отмечено длительное сохранение высоких абсолютных значений  $\nabla\phi$ , временная динамика которого представлена всего двумя возмущениями противоположной полярности (рис. 1, г). Длительность первого из них превышает 1 ч.

Таким образом, при прохождении кучево-дождевых облаков отмечаются интенсивные изменения как величины, так и знака  $\nabla\phi$  в приземном слое атмосферы, а особенности вариаций  $\nabla\phi$  и их временная структура во время прохождения различных проявлений *Cb* существенно различаются. Поэтому необходим анализ наиболее часто встречающихся форм вариаций  $\nabla\phi$ , зарегистрированных во время прохождения над пунктом мониторинга кучево-дождевой облачности, и выявление связей между прохождением *Cb* различного генезиса и формами «медленных» вариаций  $\nabla\phi$ .

## 2. Методика отбора, формализации и обработки данных

Для решения поставленной задачи были использованы следующие данные:

– данные по градиенту потенциала электрического поля, полученные в 2006–2013 гг.;

– облачность и атмосферные явления в стандартные метеорологические сроки (временное разрешение 3 ч) на ГМС «Томск» за период 2006–2013 гг.;

– кольцевые карты погоды с фронтальным анализом;

– данные спектрорадиометра MODIS спутников Aqua и Terra для случаев прохождения различных *Cb* вблизи местного полудня.

Геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН и ГМС «Томск» располагаются соответственно на восточной и южной окраинах г. Томска, расстояние между ними составляет ~ 6 км. Из метеорологических данных ГМС «Томск» за исследуемый период

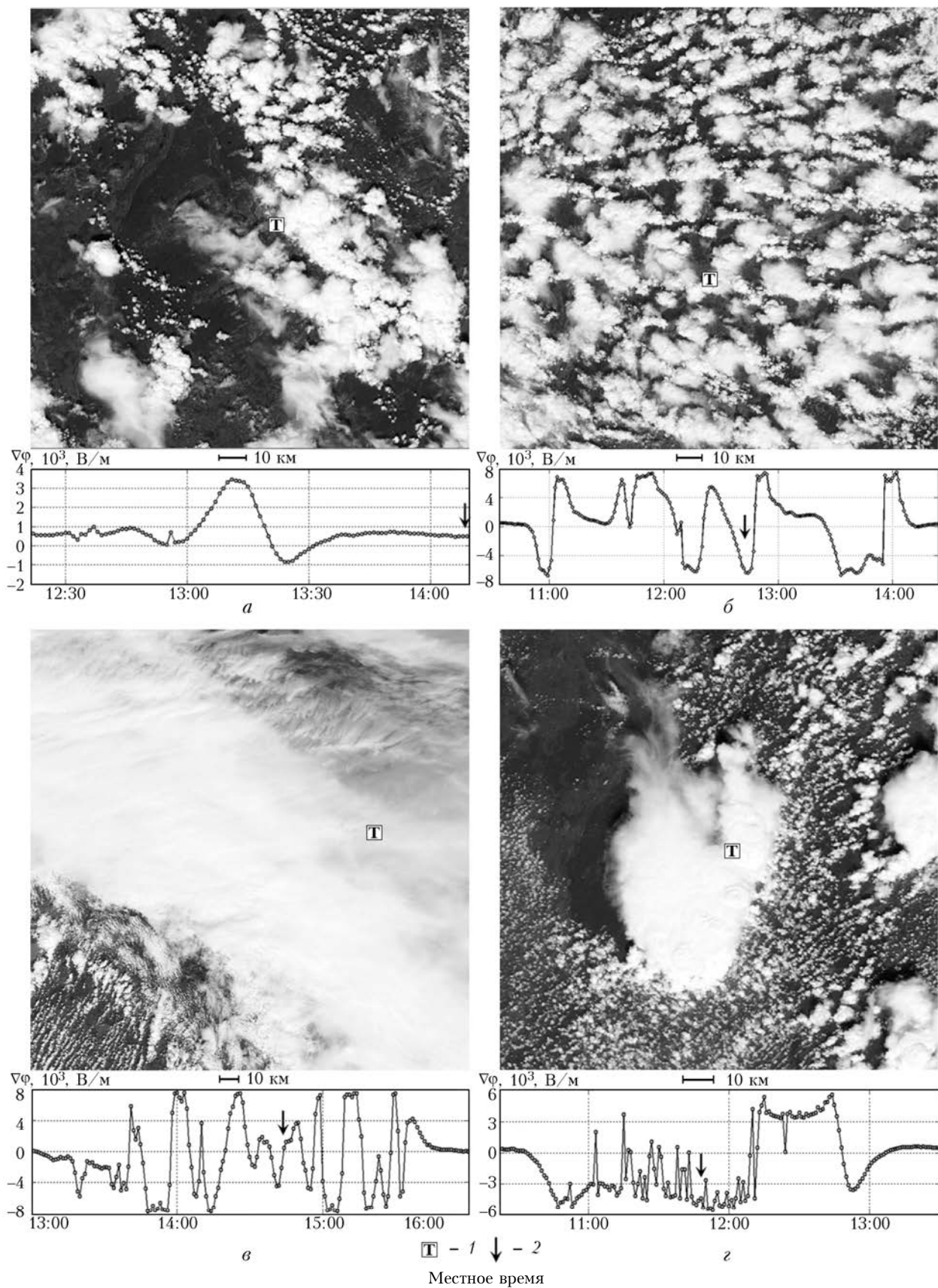


Рис. 1. Динамика и RGB-изображения MODIS во время прохождения Cb различного генезиса и конфигурации: 15.06.2007 (а), 10.05.2007 (б), 8.05.2007 (в) и 20.07.2009 г. (г). 1 – положение пункта мониторинга на спутниковом изображении (г. Томск, 56,48° с.ш.; 85,05° в.д.); 2 – момент времени, для которого получено RGB-изображение

были отобраны метеорологические сроки за теплое полугодие (май–сентябрь), во время которых погодные условия характеризовались следующими особенностями:

- наличие кучево-дождевых облаков;
- наличие ливневого дождя, града или грозы;
- отсутствие слоисто-дождевых (*Ns*), высоко-слоистых (*As*) и слоистых (*St*) облаков;
- отсутствие обложных и морсящих осадков;
- отсутствие тумана, дымки и дыма лесных пожаров.

Допускалось наличие кучевых (*Cu*), слоисто-кучевых (*Sc*), высоко-кучевых (*Ac*) и перисто-кучевых (*Cc*) облаков, сопутствующих кучево-дождевым облакам и являющихся их предвестниками, а также перистых (*Ci*) и перисто-слоистых (*Cs*), формирующих «наковальню» *Cb*. Эти формы облачности, как правило, не дают осадков, а объемные заряды в облаках этих форм на несколько порядков меньше, чем в кучево-дождевых [12]. Поэтому искажающее влияние облаков этих форм (по сравнению с кучево-дождевыми) на вариации  $\nabla\varphi$  у поверхности Земли предполагалось несущественным.

В результате предварительного отбора были выявлены случаи прохождения над пунктом мониторинга облаков конкретной формы:

- в виде изолированных одноячейковых и мультячейковых облаков;
- в виде организованных скопления кучево-дождевых облаков (линий шквалов, гряд кучево-дождевых облаков, мезомасштабных конвективных комплексов и др. [13–15]).

При отборе учитывалось, что интервал времени между отдельными событиями должен составлять не менее 30 мин. Однако не учитывались случаи прохождения *Cb* в системе облаков *Ns–As* («затопленная конвекция»), поскольку в таких ситуациях имело место наложение «откликов» напряженности электрического поля от различных типов облаков. Такие условия наблюдались при прохождении холодных фронтов I рода и фронтов окклюзии, а иногда и при прохождении теплых фронтов в теплый период года [16–17]. Всего было выявлено 463 случая прохождения отдельных типов кучево-дождевых облаков.

На следующем этапе обработки в выбранных интервалах данных мониторинга определялись участки с интенсивными изменениями  $\nabla\varphi$ , которые были связаны с прохождением кучево-дождевой облачности. В этих же интервалах выделялись отдельные «структурные элементы вариаций», обусловленные воздействием объемных зарядов в кучево-дождевых облаках и выпадающих осадках: отрицательные и положительные возмущения градиента потенциала  $d_n$ . За отрицательные и положительные возмущения  $\nabla\varphi$  принимались возмущения с  $\nabla\varphi < B_1$  и  $\nabla\varphi > B_2$ , где  $B_1$  и  $B_2$  – соответствующие граничные значения  $\nabla\varphi$ .

Для теплового времени года граничные значения принимались равными  $B_1 = B_0 - s$ ,  $B_2 = B_0 + s$ , где  $B_0$  – невозмущенное значение  $\nabla\varphi$  летом

( $B_0 \sim 150$  В/м),  $s = 750$  В/м – эмпирически подобранное граничное значение напряженности поля, позволяющее отделить вариации  $\nabla\varphi$ , обусловленные *Cb*, от влияния других сопутствующих форм облачности. Исходные значения  $\nabla\varphi$  заменялись модифицированными значениями  $\nabla\varphi'$ , равными  $B_1$ ,  $B_0$  или  $B_2$  ( $B_1$  при  $\nabla\varphi \leq B_1$ ,  $B_0$  при  $B_1 \leq \nabla\varphi \leq B_2$  и  $B_2$  при  $\nabla\varphi \geq B_2$  соответственно). Одиночные выбросы  $\nabla\varphi$ , обусловленные откликом на близкие молниевые разряды, восстанавливались до соседних значений  $\nabla\varphi$  и из дальнейшей обработки исключались. Предложенная методика позволила стандартизировать процедуру выявления и разграничения структурных элементов вариаций  $\nabla\varphi$ .

Формализация вариаций  $\nabla\varphi$  позволила провести автоматизированную обработку данных и типизацию структурных элементов вариаций градиента потенциала. В результате отработки определено количество и последовательность возмущений различной полярности ( $d_n$ ) для каждого анализируемого случая. Последовательности возмущений различной полярности позволили выделить характерные типы «медленных» вариаций.

Для каждого из выделенных типов вариаций оценивались значения параметров, описывающих особенности поведения (рис. 2): общая длительность  $D_v$ , размах вариаций  $A_v$ , параметры временной структуры вариаций  $\nabla\varphi$ .

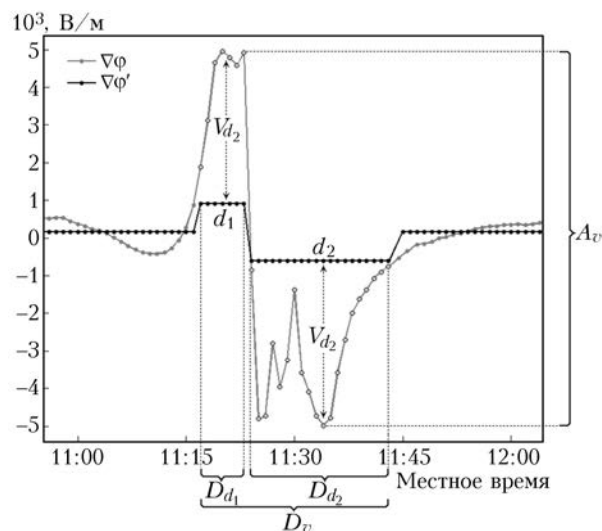


Рис. 2. Основные параметры медленных вариаций  $\nabla\varphi$ :  $D_v$ ,  $A_v$ ,  $D_{dn}$ ,  $V_{dn}$ , определяемые при прохождении *Cb*. На рисунке  $\nabla\varphi$  и  $\nabla\varphi'$  – исходные данные и их модифицированные значения

Общая длительность вариаций  $D_v$  представляет собой промежуток времени от начала первого возмущения до окончания последнего, а  $A_v$  – размах вариаций  $\nabla\varphi$  за интервал  $D_v$ . Расчет  $A_v$  осуществлялся по исходным значениям  $\nabla\varphi$  в выделенных временных границах. Для исследования временной структуры вариаций  $\nabla\varphi$  определялись следующие параметры (см. рис. 2): число «медленных» возмущений одного знака, длительность  $n$ -го возмущения ( $D_{dn}$ ) или интервал времени между началом и окончанием

чением  $n$ -го возмущения, длительность процесса перехода (фронт возмущения) от одного возмущения ( $d_n$ ) к другому ( $d_{n+1}$ ), среднее значение градиента потенциала за интервал существования  $n$ -го возмущения ( $V_{dn}$ ). Значения  $D_{dn}$  рассчитывались на основе модифицированных значений  $\nabla\phi'$ , в то время как  $V_{dn}$  определялись по исходным данным  $\nabla\phi$ .

На основе синоптических карт и данных спектрометра MODIS (видимое и ИК-изображения облачности, оптическая толщина облаков, температура в вершине облака, термодинамическая фаза облаков) во время случаев прохождения  $Cb$ , совпадающих по времени с моментами пролета спутников Aqua и Terra, были установлены особенности развития и конфигурации кучево-дождевых облаков. Всего было проанализировано 86 случаев, из которых прохождение фронтальных кучево-дождевых облаков отмечалось в 42 случаях, внутримассовых  $Cb$  – в 40, а  $Cb$  в составе МКК и их скоплениях – в 4 случаях.

### 3. Результаты анализа и их обсуждение

В результате обработки формализованных исходных данных были выделены основные типы вариаций  $\nabla\phi$ , связанные с прохождением в окрестностях пункта измерения кучево-дождевых облаков различного происхождения и отличающиеся количеством и последовательностью смены знака «медленных» возмущений.

Анализ данных обработки показал, что вариации  $\nabla\phi$  во время 2/3 случаев прохождения  $Cb$  относятся к 10 основным типам и включают в себя от одного до пяти возмущений различной полярности. Качественно форма вариаций  $\nabla\phi$  выделенных типов

иллюстрируется рис. 3, а их повторяемость представлена на рис. 4. Формы вариаций  $\nabla\phi$  для остальных случаев прохождения  $Cb$  (182 случая, 39,3%) характеризуются значительно более сложным видом, большим количеством возмущений и имеют существенно более низкую повторяемость. Средние значения  $D_v$  и  $A_v$  для каждого из выделенных типов вариаций  $\nabla\phi$  представлены в табл. 1. Общая длительность выделенных типов вариаций  $\nabla\phi$  изменяется в пределах  $D_v \sim 10$ –70 мин, а размах вариаций  $\nabla\phi$  лежит в диапазоне  $A_v \sim 2300$ –10400 В/м.

Перейдем к изучению временной структуры выявленных типов вариаций  $\nabla\phi$ . Средние абсолютные значения  $\nabla\phi$  отдельных возмущений  $V_{dn}$  составляют в среднем  $\sim 2400$  В/м и изменяются в диапазоне 1200–3700 В/м. Следует подчеркнуть, что для крайних (первого и последнего) возмущений типов 3–10  $D_d$  в целом выше, а  $V_d$  ниже, чем для промежуточных возмущений. Эту особенность можно объяснить постепенным возрастанием/убыванием (обратно пропорционально квадрату расстояния) значения  $\nabla\phi$  при подходе/отходе конвективной ячейки или конгломерата ячеек к пункту/от пункта наблюдения. Непосредственно под облаком при смене знака доминирующего объемного заряда изменение величины и знака  $\nabla\phi$  приземного электрического поля происходит сравнительно быстро ( $\sim 1$ –3 мин). Длительность отдельных структурных элементов ( $D_{dn}$ ) составляет в среднем  $\sim 10$  мин и изменяется в диапазоне от 6 до 15 мин. На основе  $D_{dn}$  и  $V_{dn}$  для каждого из основных типов вариаций  $\nabla\phi$  получены осредненные профили временной динамики  $\nabla\phi$ , описывающие характерные особенности отклика в приземном электрическом поле при прохождении  $Cb$  различного генезиса. Средние значения  $D_{dn}$  и  $V_{dn}$  выделенных типов вариаций  $\nabla\phi$  суммированы в табл. 2.

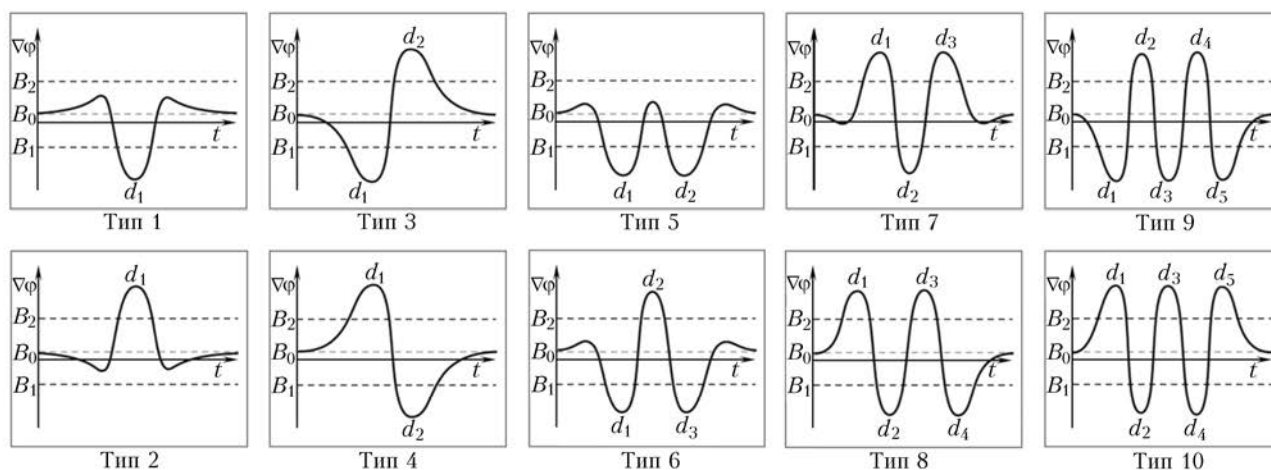


Рис. 3. Идеализированная форма основных типов вариаций, зарегистрированных во время прохождения  $Cb$

Таблица 1

Средние значения длительности  $D_v$  и размаха вариаций  $A_v$  градиента потенциала при прохождении  $Cb$  различного генезиса

Тип вариаций	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_v$ , мин	13,5	9,5	32,0	30,0	38,0	37,0	29,0	50,0	67,0	60,0
$A_v$ , В/м	2550	2250	6300	6200	2700	8350	8150	10000	8860	10350

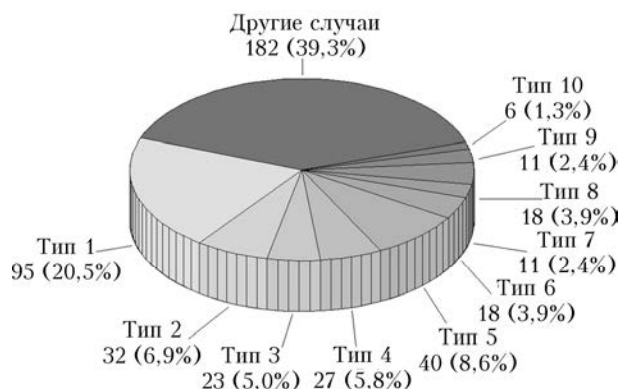


Рис. 4. Повторяемость различных типов вариаций, зарегистрированных во время прохождения *Cb*

Существование некоторых выявленных типов вариаций  $\nabla\phi$  подтверждается данными работ [3, 6, 8, 9], посвященных исследованию вариаций градиента потенциала при прохождении одиночного *Cb*. В этих работах на качественном уровне анализировались формы вариаций  $\nabla\phi$  у поверхности Земли при движении биполярного поляризованного облака с различным наклоном. Поэтому те 4 типа вариаций  $\nabla\phi$ , которые выделены экспериментально в [4] (Восточная Сибирь, *Cb* в грозовой стадии, 23 случая) и в [6] (Якутия, *Cb* в грозовой стадии, 23 случая), имеют сходство с 1, 3, 4 и 5–6-ми типами вариаций  $\nabla\phi$ , полученными в данной работе. Модельные расчеты [8, 9] отклика  $\nabla\phi$  на различных расстояниях от перемещающегося кучево-дождевого облака, с электрической структурой в виде вертикально поляризованного диполя (аналог одиночного *Cb*), показали, что формы модельных вариаций  $\nabla\phi$  близки к экспериментально выделенным формам  $\nabla\phi$  типов 1 и 7.

Совместный анализ данных  $\nabla\phi$ , синоптических карт и данных MODIS (для случаев дневных наблюдений) позволил связать выявленные типы вариаций с конкретными метеорологическими условиями.

Сравнительно плавное изменение величины  $\nabla\phi$  с одним–тремя последовательными возмущениями  $\nabla\phi$ , общая длительность которых не превышает 1 ч, обусловлено, как правило, прохождением одиночных изолированных кучево-дождевых облаков. Во время прохождения через пункт мониторинга нескольких

близко расположенных кучево-дождевых облаков внутримассового скопления наблюдаются сложные вариации  $\nabla\phi$ , связанные с суперпозицией электрических полей, а следовательно, и возмущений, обусловленных каждым из *Cb*. Амплитуда вариаций от отдельных *Cb* зависит от расстояния до пункта наблюдения. При последовательном прохождении нескольких одиночных *Cb* с небольшим временным интервалом (менее 1 ч) вариации  $\nabla\phi$  от каждого последующего облака, вследствие того, что электрическое поле не успевает восстановиться до нормальных значений, наблюдаются на фоне более высоких значений  $\nabla\phi$ .

Поскольку время жизни отдельной конвективной ячейки составляет ~30–45 мин [13, 14], то типы 1 и 2, вероятнее всего, связаны с конвективными ячейками, находящимися в стадии диссипации и роста соответственно, когда объемные электрические заряды *Cb* относительно невелики как по плотности заряда, так и по размерам, а электрическая структура *Cb*, по данным самолетных измерений [18, 19], характеризуется противоположной поляризацией.

По данным синоптических карт и спектро радиометра MODIS с одиночными одноячейковыми кучево-дождевыми облаками, находящимися на различных стадиях развития, связаны, главным образом, типы 1–7. Однако подобная форма отклика в  $\nabla\phi$  также возможна и под влиянием суперпозиции электрических полей двух смежных *Cb*, например типа 1 и 2. В случае одиночного источника типы 3–7 связаны с конвективными ячейками на различных этапах стадии зрелости, причем типы 6 и 7 предположительно связаны с ячейками на максимальной стадии развития.

Кучево-дождевые облака, распространяющиеся в облачной системе атмосферного фронта и представляющие собой конгломераты (гряды, скопления) мультячейковых облаков, характеризуются резкими изменениями величины  $\nabla\phi$  и целой серией непродолжительных возмущений  $\nabla\phi$ , общая длительность которых составляет, как правило, несколько часов. Прохождение фронтальных мультячейковых кучево-дождевых облаков или близкорасположенных одноячейковых *Cb* внутримассового скопления, приводящее к суперпозиции электрических полей смежных конвективных ячеек, формирует в отклике  $\nabla\phi$  типы 8–10 и, с некоторой вероятностью, типы 3–7.

Таблица 2

Средние значения  $D_{dn}$  и  $V_{dn}$  отдельных структурных элементов  $d_n$  для выделенных типов вариаций градиента потенциала

Тип вариаций	$D_{dn}$ , мин					$V_{dn}$ , В/м				
	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
1	13,5	–	–	–	–	–1400	–	–	–	–
2	9,5	–	–	–	–	1550	–	–	–	–
3	14,0	11,5	–	–	–	–2450	2250	–	–	–
4	11,5	15	–	–	–	2850	–1850	–	–	–
5	14,5	12,6	–	–	–	–1350	–1150	–	–	–
6	12,5	6	11,0	–	–	–2550	3350	–1750	–	–
7	4,5	9,5	9,5	–	–	2250	–2900	1950	–	–
8	9	9	12	10,5	–	2700	–2950	3400	–1800	–
9	16,5	11,5	5,5	9	9,5	–2300	2750	–2800	2250	–1550
10	12	4,0	9	10,5	14,0	2750	–3150	3700	–3200	2150

Прохождение мезомасштабных конвективных комплексов характеризуется длительным сохранением высоких значений  $\nabla\varphi$  ( $\nabla\varphi > 1000$  В/м) и приводит, как правило, к регистрации одного—двух возмущений противоположной полярности. Длительность каждого из них может превышать 1 ч. Поскольку число случаев прохождения *Cb* в составе МКК и их скоплений существенно меньше, чем внутримассовых и фронтальных мультячейковых кучево-дождевых облаков, то вариации  $\nabla\varphi$ , связанные с МКК, в отдельный тип не выделялись.

Для остальных случаев *Cb*, не вошедших в 10 основных типов, формы вариаций  $\nabla\varphi$  обусловлены влиянием на приземное электрическое поле множества последовательно проходящих кучево-дождевых облаков или сложного конгломерата *Cb*.

### Заключение

На основании предложенной методики формализации и обработки «медленных» вариаций приземного электрического поля во время прохождения кучево-дождевых облаков проведена классификация типов вариаций  $\nabla\varphi$  и выявлены наиболее часто встречающиеся типы вариаций  $\nabla\varphi$ . Определены параметры, характеризующие вариации  $\nabla\varphi$  в целом и их структурные элементы, для каждого из основных типов «медленных» вариаций.

По результатам совместного анализа вариаций  $\nabla\varphi$ , синоптических карт и данных спектрометра MODIS выявлены связи между характерными особенностями анализируемых типов вариаций  $\nabla\varphi$  и *Cb* различного происхождения (одиночное *Cb*, конгломерат *Cb*, МКК). В случае прохождения одиночной конвективной ячейки определены типы вариаций  $\nabla\varphi$ , характерные для различных стадий развития внутримассового *Cb*.

Форма основных типов вариаций приземного электрического поля во время прохождения кучево-дождевой облачности совместно с характерными значениями параметров, описывающих особенности вариаций  $\nabla\varphi$  и их временную структуру, могут быть использованы для исследования мезомасштабной структуры облачных систем атмосферных фронтов и выявления очагов «затопленной конвекции» в условиях изменяющегося климата.

Поддержано ФЦП № 14.575.21.0105.

1. *Мохов И.И., Акперов М.Г.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42, № 4. С. 467–475.

2. *Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I.* Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6, N 3. P. 035202.
3. *Тверской Н.П.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1949. 252 с.
4. *Филиппов А.Х.* Грозы Восточной Сибири. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 75 с.
5. *Понов И.Б.* Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 152–161.
6. *Bennett A.J., Harrison R.G.* Atmospheric electricity in different weather conditions // Weather. 2007. V. 62. P. 277–283.
7. *Toropov A.A., Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Starodubtsev S.A.* Experimental observations of strengthening the neutron flux during negative lightning discharges of thunderclouds with tripolar configuration // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2013. V. 94. P. 13–18.
8. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. 687 p.
9. *Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Фирстов П.П., Бузевич А.В.* Базовые модели источников вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. П-Камчатский. 2007. № 2. Вып. 10. С. 60–64.
10. *Азбукин А.А., Богущевич А.Я., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47–52.
11. *Нагорский П.М., Морозов В.Н., Смирнов С.В., Пустовалов К.Н.* Электродный слой в электрическом поле мощной конвективной облачности // Изв. вузов. Радиофиз. 2013. Т. 56, № 11. С. 853–863.
12. *Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М.* Электричество облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 94 с.
13. *Wang P.K.* Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 467 p.
14. *Шметер С.М.* Термодинамика и физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 287 с.
15. *Bluestein H.B.* Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. 456 p.
16. *Bluestein H.B.* Synoptic-Dynamic Meteorology in Mid-latitudes. V. II: Observations and Theory of Weather Systems. New York: Oxford University Press, 1993. 608 p.
17. *Шметер С.М.* Характеристики затопленной конвекции во фронтальных облаках и условия ее образования // Метеорол. и гидрол. 1990. № 11. С. 36–44.
18. *Камалдина И.И.* Об изменении электрической структуры кучево-дождевых облаков в процессе их развития // Труды ГГО. 1968. Вып. 225. С. 85–91.
19. *Михайловский Ю.П., Кашилева Л.В.* Методы и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью самолетов // Радиолокационная метеорология и активные воздействия. С.-Пб: Главная геофизическая обсерватория, 2012. С. 98–114.

### *K.N. Pustovalov, P.M. Nagorskiy. The main types of electric field variations during the passage of cumulonimbus clouds of different genesis.*

Variations in the potential gradient of the electric field in the surface air layer during the passage of cumulonimbus clouds (*Cumulonimbus*, *Cb*) are investigated. More than 450 cases with *Cb* were reviewed. The method of selection of the structural elements, according to the potential gradient variations caused by the passage of *Cb*, was suggested. The formalization of the selected variations was carried out and the main types of the electric field potential gradient changes were identified. The parameters characterizing the potential gradient variation and its structural elements were defined for each type of the potential gradient variations. Interrelations between the features of the potential gradient variation types and characteristics of different origin *Cb* at different development stages were described.