

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

591

*Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук В. М. Катцова,
д-ра физ.-мат. наук В. П. Мелешко*

Санкт-Петербург
2018

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
Телефон: (812) 297-43-90
ФАКС: (812) 297-86-61
e-mail: director@main.mgo.rssi.ru
web site: <http://www.voeikovmgo.ru>

Редакционная коллегия

Д-р физ.-мат. наук В. М. Катцов, д-р физ.-мат. наук Е. Л. Генихович,
чл. корр. РАН, д-р физ.-мат. наук С. К. Гулев, д-р физ.-мат. наук, профессор И. Л. Кароль,
канд. физ.-мат. наук А. А. Киселев, д-р геогр. наук, профессор Н. В. Кобышева,
д-р физ.-мат. наук В. П. Мелешко, д-р геогр. наук А. В. Мещерская,
канд. физ.-мат. наук Т. В. Павлова, канд. физ.-мат. наук Е. В. Розанов,
д-р техн. наук А. А. Синькевич, канд. физ.-мат. наук А. П. Соколов,
канд. физ.-мат. наук П. В. Спорышев, канд. физ.-мат. наук Е. Е. Федорович,
канд. геогр. наук Е. Л. Махоткина (секретарь редколлегии)

В сборнике представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по актуальным проблемам изменения климата и прогноза погоды, атмосферной диффузии и мониторинга состояния атмосферы, климатологии, дистанционного зондирования атмосферы.

Сборник рассчитан на широкий круг научных работников и инженеров, интересующихся результатами современных исследований в области метеорологии и их практическим использованием.

Рекомендуется аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

В соответствии с решением Президиума высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

Editorial board

Dr. V. M. Kattsov, Dr. E. L. Genihovich, Dr. S. K. Gulev, Dr. I. L. Karol,
Dr. A. A. Kiselev, Dr. N. V. Kobysheva, Dr. V. P. Meleshko, Dr. A. V. Mescherskaya,
Dr. T. V. Pavlova, Dr. E. V. Rozanov, Dr. A. A. Sinkevich, Dr. A. P. Sokolov, Dr. P. V. Sporyshev,
Dr. E. E. Fedorovich, Dr. E. L. Makhotkina (Editorial board secretary)

The publication deals with the results of theoretical and experimental studies on the present-day problems of changes in climate and weather forecast, atmospheric diffusion and atmospheric air condition monitoring, climatology, remote sounding of the atmosphere.

The publication is meant for a wide circle of specialists interested in the results of meteorological science development and their practical application.

It is recommended for post-graduates and students in their third or fourth year of respective speciality.

© Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова»,
2018

СОДЕРЖАНИЕ

<i>А. А. Синькевич, С. Ю. Матросов, В. Б. Попов, Ю. П. Михайловский, Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей.</i> Радиолокационные и спутниковые наблюдения слияния кучево-дождевых облаков и выпадающих из них осадков.	7
<i>А. А. Синькевич, Ю. П. Михайловский, А. М. Абшаев.</i> Исследование связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками для многоячейкового кучево-дождевого облака.	25
<i>А. В. Снегуров, В. С. Снегуров.</i> Экспериментальные исследования погрешности измерений широкополосными грозопеленгаторами.	42
<i>Ж. Ю. Анпаева.</i> Физико-статистическая модель одноячейковых градовых облаков и осадков по данным радиолокационных наблюдений.	82
<i>В. Н. Морозов.</i> Вариации электрического поля атмосферы, обусловленные гармоническими вариациями токов грозовых генераторов в модели глобальной электрической цепи в атмосфере.	92
<i>Е. В. Ракушина, К. К. Кандиева, О. Г. Анискина А. И. Погорельцев.</i> Применение аппарата естественных ортогональных функций для анализа крупномасштабных динамических процессов в средней атмосфере.	105
<i>К. Л. Восканян, А. Д. Кузнецов, О. В. Сероухова, Е. Т. Симакина.</i> Оценка возможностей ГИС-технологий для позиционирования пунктов метеорологических наблюдений.	124

<i>И. О. Лучицкая, Н. И. Белая.</i> Риски угроз здоровью населения от воздействия волн жары на юго-востоке Западной Сибири и проблемы адаптации.	141
<i>Ю. К. Калинин, А. Ю. Репин, Е. Н. Хотенко, А. В. Щелкалин.</i> Ионосферное гидирование декаметровых радиоволн.	156
<i>Ю., К. Калинин, А. Ю. Репин, Е. Н. Хотенко</i> Суперпозиция гелиогеофизических возмущений и аварийность в авиации.	167
<i>И. И. Батчаев, Л. Б. Чигирова.</i> Натурные исследования гидрологических характеристик правого притока реки Черек Безенгийский.	173
Памяти Нины Николаевны Калитиной.	183

CONTENTS

<i>Sinkevich A. A., Matrosov S. Yu., Popov V. B., Mikhailovsky Yu. P., Dovgalyuk Yu. A., Veremei N. E.</i> Radar and satellite observations of the Cb merging and precipitation from them.	7
<i>Sinkevich A. A. Michailovsky Yu. P., Abshaev A. M.</i> Investigation of the Relationship of Electrical Discharges Frequency with Radar Characteristics of Multicell Cb.	25
<i>Snegurov A. V., Snegurov V. S.</i> Experimental study of measurement accuracy of wideband direction finders thunderstorms.	42
<i>Appaeva Z. Yu.</i> Physical-statistical model of single-cell hail clouds and precipitation according to radar observations.	82
<i>Morozov V. N.</i> Variations of the atmospheric electric field due to harmonic currents of thunderstorm generators in the model of the global electrical circuit in the atmosphere.	92
<i>Rakushina E. V., Aniskina O. G., Kandieva K. K., Pogoreltsev A. I.</i> Application of the empirical orthogonal functions for the analysis of the lager-scale dynamical processes in the middle atmosphere.	105
<i>Voskanan K. L., Kuznetcon A. D., Serouhova O. S., Simakina T. E.</i> Estimation of possibilities of GIS-technology for positioning of meteorological observation ITEMS.	124
<i>Luchitskaya I. O., Belaya N. I.</i> Estimation of possibilities of GIS-technology for positioning of meteorological observation ITEMS.	141
<i>Kalinin Yu. K., Repin A. Yu., Khotenko E. N., Shchelkalin A. V.</i> Ionospheric guiding of decametric radio waves.	156
<i>Kalinin Yu. K., Repin A. Yu., Khotenko E. N.</i> Superposition of helio-geophysical disturbances and aviation perturbations. ...	167

<i>Batchaev I. I., Chigirova L. B.</i> Natural research hydrological characteristics right river flow Cherek Bezengiski. ..	173
In memory Nina N. Kalitina.	183

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СЛИЯНИЯ КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ И ВЫПАДАЮЩИХ ИЗ НИХ ОСАДКОВ

*А. А. Синькевич¹, С. Ю. Матросов², В. Б. Попов¹,
Ю. П. Михайловский¹, Ю. А. Довгалоук¹, Н. Е. Веремей¹*

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: sinkevich51@mail.ru

² Университет Колорадо, Боулдер, Колорадо, США
325 Broadway, 80305, Boulder

Поступила в редакцию 1.11.2018
Поступила после доработки 30.11.2018

Введение

Слияние облаков наблюдалось при проведении самолетных исследований, а позднее — с помощью дистанционных средств изучения атмосферы. Установлено, что наиболее мощные и долгоживущие кучево-дождевые облака формируются путем слияния двух или нескольких конвективных облаков (Синькевич, 2001; Синькевич и др., 2009; Pozo et al., 2006; Simpson et al., 1980). За счет больших размеров слившееся облако меньше подвергается воздействию сухого воздуха, поступающего в него в процессе вовлечения, что способствует его более интенсивному развитию.

Слияние облаков оказывает сильное воздействие на их последующую трансформацию. Как наблюдения, так и данные численного моделирования показали увеличение горизонтальных размеров, высоты верхней границы и радиолокационной отражаемости образовавшегося облака (Краус и др., 2012а; Changnon, 1976; Danhong, Xueliang, 2006; Sinkevich, Krauss, 2014; Wiggert et al., 1981). В результате слияния в облаке формируется более интенсивный

восходящий поток и, соответственно, можно ожидать увеличения осадков по сравнению с изолированным облаком. Изменение динамики движения объемов облачного воздуха может приводить к формированию многомодального спектра облачных частиц за счет взаимодействия новых появляющихся капель и остатков крупных облачных частиц (Kogan, Shapiro, 1996). При этом изменяется количество и интенсивность осадков.

Основной задачей настоящей статьи является анализ динамики развития облаков в результате их слияния и изменения интенсивности и количества выпадающих из них осадков. Исследуется также микроструктура облаков в процессе их слияния. Рассматривается случай слияния двух кучево-дождевых облаков примерно одинаковых геометрических размеров, который наблюдался 22 июля 2017 года в районе Санкт-Петербурга. Анализируется период времени, когда облака развивались. Позже из объединенного облака выпали осадки с градом.

В исследовании использовались данные, полученные с помощью ДМРЛ-С — метеорологического поляризационного радиолокатора, работающего на длине волны 5,3 см (Временные методические указания..., 2017). Он установлен в поселке Воейково Ленинградской области, который находится в 10 км восточнее Санкт-Петербурга. В статье также анализируются данные, полученные многоканальным радиометром SEVERI, установленным на спутнике Метеосат. Период обзора радиометром составлял 5 мин.

Состояние атмосферы и анализ результатов радиозондирования

Синоптическая ситуация района исследований была обусловлена размытым барическим полем, то есть была внутримассовая ситуация. В атмосфере наблюдалась вертикальная термическая неустойчивость. Нижняя граница облаков находилась на высоте 1,0 км при температуре 10,6 °С. Запас энергии неустойчивости в слое развития конвекции составлял 1348 Дж/кг. Уровень конвекции был равен 9,0 км (-47,4 °С), далее начинался задерживающий слой, связанный

с тропопаузой. Значение энергии неустойчивости не очень велико, поэтому можно было ожидать, что верхняя граница облаков будет располагаться вблизи высоты 9 км. Высота нулевой изотермы была равна 2,2 км, это способствовало выпадению твердых осадков, которые не успевали растаять. Отмечался сдвиг ветра: в нижних слоях атмосферы ветер имел северное направление, а начиная с высоты 7 км, происходило его изменение на западное.

Анализ развития облаков по радиолокационным измерениям и результатам радиометрического зондирования со спутника Метеосат

Первое мощное кучевое облако появилось на экране радиолокатора в 7 ч 40 мин ВСВ (10 ч 40 мин местного времени). Это время для удобства дальнейших рассуждений принимаем за начало отсчета «0 мин». Параметры поляризационных радиолокационных измерений (отражаемость на горизонтальной поляризации $Z_h < 5$ дБZ и дифференциальная отражаемость $Z_{dr} \approx 0$ дБ) были характерны для облачных капель и мороси. Это изолированное облако просуществовало до 60 мин, когда начался процесс слияния со вторым облаком.

Облако развивалось по вертикали, и на 20-й минуте его верхняя граница превысила 6 км ($-25,8$ °C). В верхней части была обнаружена зона высокой отражаемости ($Z_h > 35$ дБZ). Дифференциальная отражаемость Z_{dr} в этой зоне была близка к 3,2 дБ, что могло свидетельствовать о наличии горизонтально ориентированных ледяных кристаллов внутри отражающего объема (Kumjian, 2013). Коэффициент кросскорреляции ρ_{HV} между радиолокационными сигналами на горизонтальной и вертикальной поляризациях был близок к 1, указывая на однородность форм и ориентацию облачных частиц. Таким образом, поляризационные измерения указывают на то, что уже на 20-й минуте в облаке присутствовала кристаллическая фракция. Обобщенная упрощенная схема микрофизического строения облаков по результатам анализа поляризационных радиолокационных характеристик представлена на рис. 1.

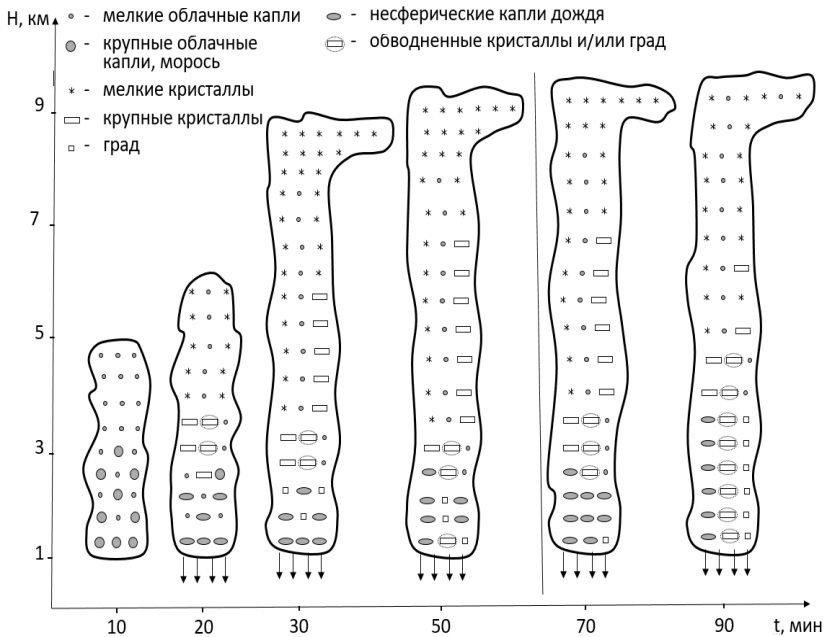


Рис. 1. Упрощенная схема микрофизического строения облаков — «северного» и объединенного после слияния. Вертикальная линия разделяет «северное» и объединенное облака.

На 24-й минуте исследуемое облако было обнаружено при анализе радиометрических данных, полученных со спутника Метеосат. В это же время южнее начало развиваться другое мощное кучевое облако. Для удобства дальнейших рассуждений первое облако будем называть «северное», второе — «южное».

Зона высокой отражаемости в «северном» облаке начала постепенно понижаться и находилась на высоте 1—2 км (30 мин). Облако перешло в кучево-дождевую стадию. По радиолокационным данным его верхняя граница достигла 8,7 км. Происходил быстрый

рост крупных частиц и их концентрации. Максимальная отражаемость Z_h увеличилась до 51,5 дБZ в нижней части облака. Из него начали выпадать интенсивные осадки. Максимум дифференциальной отражаемости был равен 3,9 дБ, он находился на высоте 6 км, указывая на наличие крупных кристаллов (возможно обводненных).

К 50—60-й минутам развития оба облака имели зону повышенной отражаемости вблизи нижней границы, что указывало на выпадение осадков. Высота верхней границы «северного» облака превысила 8 км. В его большей части дифференциальная отражаемость находилась в пределах 0—1 дБ. Отражаемость Z_h составила 50 дБZ на высоте около 1 км, указывая на наличие интенсивных осадков. Относительно малые значения Z_{dr} и достаточно большие величины Z_h характерны для частиц града, имеющих квазисферическую форму (Временные методические указания..., 2017). Значения Z_{dr} на высотах выше нулевой изотермы были также в основной части облака небольшими (0—1 дБ), что характерно для кристаллических агрегатов (рис. 2). В отдельных областях облака, однако, величины Z_{dr} достигали 3—4 дБ на высотах 5 км и выше. Это можно объяснить наличием кристаллических частиц простых форм с ярко выраженной несферичностью. Коэффициент кросскорреляции для большей части облака был близок к 1. В нижней части облака его минимальные значения были равны 0,85—0,95, что может указывать на выпадающие осадки, включая частицы града (Matrosov et al., 2013).

К рассматриваемому периоду времени «южное» облако также находилось в кучево-дождевой стадии. Его верхняя граница по радиолокационным данным превышала 9 км, по спутниковым данным верхняя граница располагалась вблизи 8 км. Максимум отражаемости отмечался на высоте 1 км. Отражаемость от облака Z_h достигла максимального значения, равного 53 дБZ (60-я минута развития), указывая на наличие очень интенсивных осадков, включая град. Данные спутникового зондирования показывали наличие пикселей с кристаллической фракцией. На 60-й минуте началось слияние двух кучево-дождевых облаков.

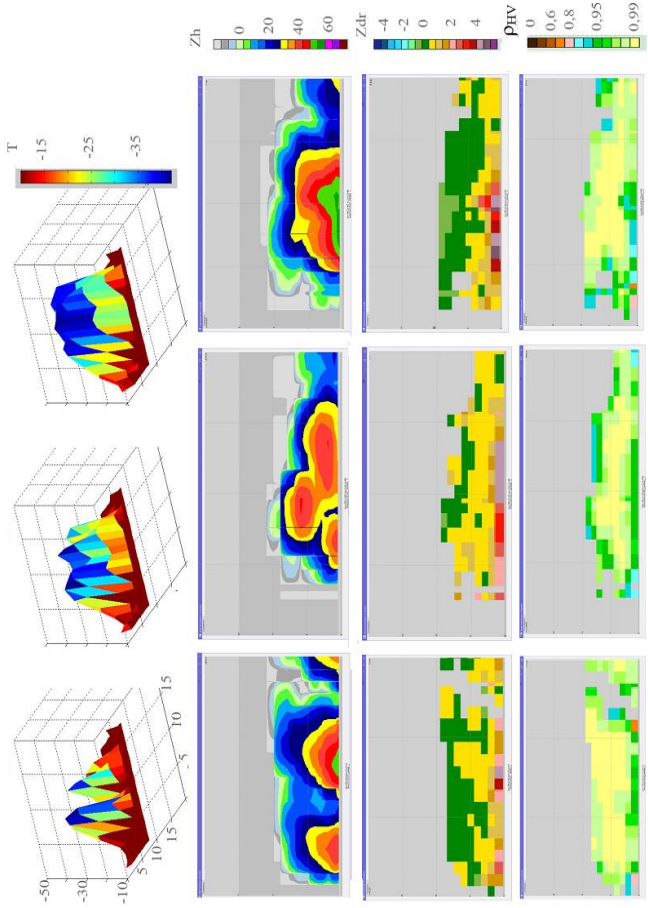


Рис. 2. Трехмерное поле радиационной температуры T ($^{\circ}\text{C}$), полученное в канале 10,8 мкм радиометра SEVERI (верхние рисунки); характерные вертикальные сечения радиолокационной отражаемости Z_h (дБZ) (второй ряд рисунков), дифференциальной отражаемости Z_{dr} (дБ) (третий ряд рисунков) и коэффициента кросскорреляции ρ_{HV} (нижний ряд рисунков) для 60, 70 и 80 минут развития облака (слева направо).

Трехмерное поле радиационной температуры, полученное в канале 10,8 мкм радиометра SEVERI, иллюстрирующее процесс слияния облаков, приводится на рис. 2. На этом же рисунке представлены характерные вертикальные сечения радиолокационных параметров сливающихся облаков в разные моменты времени.

На 70-й минуте развития процесс слияния продолжался, трехмерное поле радиационной температуры, полученное со спутника Метеосат, демонстрирует процесс объединения облаков (рис. 2). При этом сохраняются отдельно обе вершины. Радиолокационные измерения указывали на расположение верхней границы объединенного облака на высоте 9 км. Максимальное значение отражаемости было равно 49 дБZ и находилось на высоте 1 км, указывая на интенсивные осадки. В облаке имелось три области повышенной отражаемости (рис. 2): две располагались вблизи основания облака, с ними связаны интенсивные выпадающие осадки, третья находилась на высоте 6—8 км ($-26,3 \dots -41,4$ °C) и, видимо, была связана с областью, где происходит рост града. В изолированной области верхней части облака были зафиксированы максимальные значения $Z_{dr} = 4,3$ дБ, которые характерны для преимущественно горизонтально ориентированных кристаллов простых форм (не исключено, впрочем, влияние помех на дифференциальную отражаемость около верхней границы облака, где мощность отраженных радиолокационных сигналов мала).

Примерно такие же значения Z_{dr} ($\sim 4,3$ дБ) наблюдались в нижней части облака. Можно полагать, что высокие значения дифференциальной отражаемости вблизи основания облака связаны с зоной выпадения ливневых осадков, содержащих крупные несферические капли и, возможно, обводненные градины. Увеличению Z_{dr} также могли способствовать резонансные эффекты обратного рассеяния на обводненных крупных частицах града (Ryzhkov et al., 2013). Большие значения дифференциальной отражаемости, зафиксированные несколько выше нулевой изотермы, могут указывать на то, что крупные жидкие капли могли быть вынесены туда восходящими конвективными потоками. Взаимодействие кристаллов с переохлажденными каплями приводит

к формированию града. Коэффициент кросскорреляции ρ_{HV} вблизи высоты 8 км был равен 0,85, такие его значения у верхней границы облака могли быть также вызваны малыми значениями отношения сигнал / шум. Для остального объема облака он был примерно равен 1, за исключением нижнего слоя, где он был понижен, что могло быть обусловлено присутствием града.

К 80-й минуте завершилось слияние облаков. В облаке сформировалась одна зона высокой отражаемости, связанная с выпадающими осадками (рис. 2). Ее ширина составила 10 км. Верхняя граница облака превысила 8 км по данным радиометрических измерений со спутника. Максимальная отражаемость фиксировалась вблизи нижней границы и была равна 56,5 дБZ, что обусловлено наличием града. Область с максимальными значениями дифференциальной отражаемости располагалась в нижней части облака и была связана с выпадающими осадками, максимальное значение $Z_{dr} = 4,7$ дБ фиксировалось на высоте 2 км. Столь высокие значения Z_{dr} и Z_h указывают на то, что осадки носят ливневой характер, в них присутствуют крупные капли и обводненные градины. В зоне осадков коэффициент кросскорреляции имел значения менее 0,85, что в совокупности с высокой отражаемостью является хорошим индикатором града. В это время с помощью грозопеленгационной системы *Blizortung* было зафиксировано два электрических разряда в облаке.

На 90-й минуте интенсивность осадков уменьшилась. Произошли изменения в структуре облака. Область повышенной отражаемости в этот момент времени находилась на высоте 3 км (-6 °C). Максимальное значение $Z_h = 57$ дБZ указывает на присутствие града (Абшаев, Малкарова, 2006). В нижней части облака (на высоте 2 км) фиксируются интенсивные осадки ($Z_{dr} = 5,8$ дБ), они носят ливневой характер, в них присутствуют крупные капли и/или градины, которые могут быть обводнены. При этом структура облака такова, что непосредственно к зоне выпадения осадков примыкает зона, где отражаемость невелика и составляет не более 25 дБZ. Дифференциальная отражаемость там также невелика и близка к 0 дБ. Здесь выпадают жидкие осадки относительно малой интенсивности.

В это время по данным грозопеленгационной системы Алвес была зарегистрирована молния в облаке; по данным Blizortung количество разрядов равнялось 6.

Изменение осадкообразования в процессе слияния облаков

Рассмотрим изменение характеристик облаков и осадков вследствие слияния. На начальном этапе развития в «северном» облаке присутствовали только мелкие капли (рис. 1). Оно достаточно быстро развивалось, и на 20-й минуте в облаке была зафиксирована кристаллическая фракция. Еще через 10 минут оно перешло в кучево-дождевую стадию, из него начали выпадать осадки в виде дождя. На 40-й минуте осадки по-прежнему выпадали в виде дождя и были связаны с таянием крупных кристаллов. На 50—60-й минутах на высотах 4—6 км были обнаружены частицы града, которые росли за счет коагуляции с каплями. Характер осадков изменился, частицы града не успевали растаять в облаке и начали выпадать в виде осадков наряду с каплями. После слияния облаков происходит усиление процесса формирования града. Крупные капли и градовые частицы регистрируются уже на высотах 6—8 км. Осадки носят ливневой характер, в них присутствуют частицы града. Таким образом, из приведенного анализа можно сделать вывод о том, что формирование града после слияния облаков усилилось.

Измеренные радиолокационные характеристики облаков и осадков приведены на рисунках 3—6. Они включают: максимальную высоту верхней границы H_г (по уровню отражаемости 5 дБЗ), максимальную отражаемость Z_h, объемы переохлажденных частей облака V₃₅, V₄₅, V₅₀ с отражаемостями Z_h, превышающими 35, 45 и 50 дБЗ соответственно, максимальную интенсивность осадков I_m и поток осадков F. Поток осадков рассчитывался как интеграл от интенсивности осадков по площади конвективной ячейки. Представлены также характеристики облаков, полученные из результатов радиационных измерений радиометром SEVERI, установленном на спутнике Метеосат: максимальная интенсивность осадков I_M и поток осадков F_M.

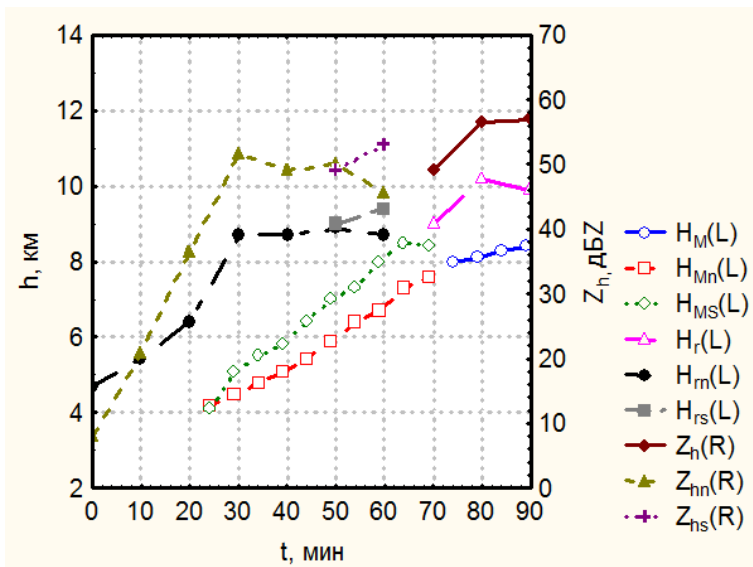


Рис. 3. Изменение во времени высоты верхней границы облака (левая ось) и отражаемости (правая ось).

Индексы «n» и «s» указывают на сливающиеся облака, располагавшиеся северней и южней по отношению друг к другу, отсутствие индекса — слившееся облако.

Индексы М и г указывают на измерения с помощью спутника Метеосат и радиолокатора.

По радиолокационным измерениям верхняя граница «северного» облака к 50-й минуте развития достигла 8,9 км и далее несколько понизилась (рис. 3). Верхняя граница «южного» облака к моменту слияния (70 мин) располагалась на высоте 9,4 км. Оценки высоты верхней границы облаков по результатам спутниковых радиометрических измерений с учетом данных радиозондирования показывают, что к моменту слияния верхние границы «северного» и «южного» облаков располагались на высотах 7,6 и 8,4 км соответственно. За рассматриваемый период после слияния облаков (70—90 мин) максимальная высота верхней границы составила

10,2 и 8,4 км по радиолокационным и радиометрическим данным соответственно.

Из представленных данных видно, что верхняя граница облаков по радиолокационным данным заметно превосходит рассчитанную по данным спутниковых радиационных измерений. Это может объясняться в частности тем, что в рассматриваемых широтах размер пикселя, где осуществляется измерение радиационной температуры, превосходит 6 км и становится сопоставим с вертикальными и горизонтальными размерами облаков. На ранней стадии развития в поле зрения радиометра попадает не только исследуемое облако, но и участки облачности и поверхности, примыкающие к облаку и имеющие более высокую радиационную температуру, чем верхняя граница. Явление параллакса также приводит к увеличению погрешности в измерении радиационной температуры облака. По мере развития облака у него увеличивались горизонтальные размеры, соответственно уменьшались указанные погрешности измерений радиационной температуры, происходило постепенное сближение соответствующих высот облаков. Другой причиной различия верхних границ облаков по наземным радиолокационным и спутниковым радиометрическим данным может являться тот факт, что слой облака, формирующий излучение черного тела, может составлять несколько сотен метров.

На 70-й минуте развития произошло слияние облаков, через 10 минут наблюдается скачкообразное увеличение высоты верхней границы до 10,2 км по радиолокационным измерениям. По радиометрическим измерениям верхняя граница облака также увеличилась, но не столь существенно. Анализ результатов радиозондирования показал, что высота уровня конвекции равна 9,0 км. Верхняя граница облаков может несколько превосходить уровень конвекции. Следовательно, высота верхней границы облаков, полученная из результатов радиолокационных измерений, превосходит примерно на 1 км соответствующую величину, полученную из данных аэрологического зондирования, и на 1,9 км — из радиометрических измерений. Учитывая, что отражаемость от облака в это время была достаточно велика (56,5 дБZ), можно

предположить, что значения высоты верхней границы облаков по результатам радиолокационного зондирования завышены вследствие влияния боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Через 10 мин после слияния облаков (80 мин) регистрируется существенное увеличение радиолокационной отражаемости Z_h на 7,5 дБ. Отметим, что аналогичные результаты были получены нами и ранее (Краус и др., 2011). Так, например, статистический анализ характеристик сливающихся облаков в Саудовской Аравии показал, что среднее значение увеличения максимальной отражаемости после слияния составило 4,2 дБZ (Краус и др., 2012a; Sinkevich, Krauss, 2014). Это увеличение отражаемости может быть объяснено появлением крупных кристаллических частиц в облаке. Зоны с максимальным значением отражаемости находились на высоте 1 км. Здесь фиксировались ливневые осадки с градом.

К 70-й минуте развития вершины обоих сливающихся облаков находились вблизи изотермы -40 °C. После слияния радиационная температура уменьшилась до $-44,4$ °C (90 мин). Таким образом, верхняя граница облаков находилась при температуре, когда отмечается гомогенная кристаллизация мелких капель воды. Слияние интенсифицировало вертикальное развитие объединенного облака, привело к уменьшению температуры на его верхней границе. При этом происходила интенсивная гомогенная кристаллизация в облаке, рост мелких кристаллов. Все это нашло отражение в значительном увеличении объемов переохлажденных частей с отражаемостью 35 дБZ и выше. Из рис. 4 следует, что V_{35} уменьшался в сливающихся облаках перед их слиянием, но после слияния произошло его скачкообразное увеличение. Этот объем увеличился в 2,8 раза на 70-й минуте по сравнению с соответствующей суммой объемов в сливающихся облаках на 60-й минуте. Началось увеличение объема облака с отражаемостью более 45 дБZ (в сливающихся облаках на 60-й минуте этот объем был незначительным). Начиная с 80-й минуты, началось и существенное увеличение объема облака с отражаемостью, превышающей 50 дБZ. Появление больших объемов кристаллической фракции в S_b после слияния облаков нашло свое отражение в увеличении осадков.

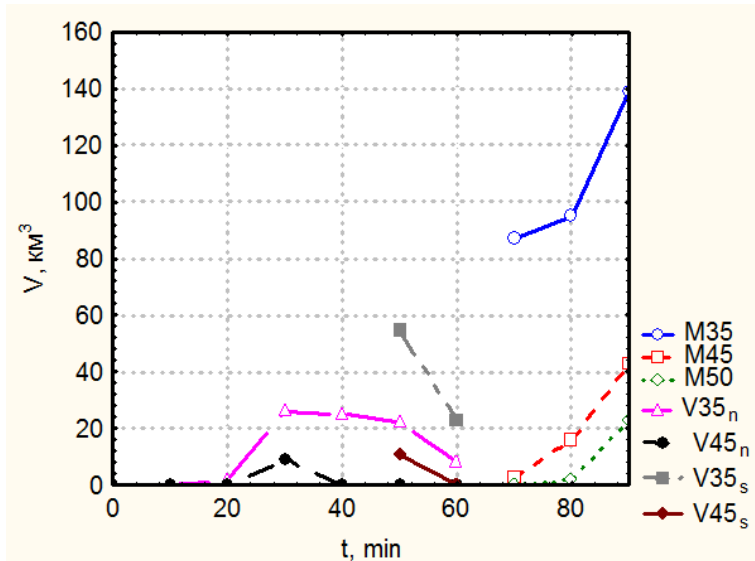


Рис. 4. Изменение во времени объемов переохлажденной части облака V35, V45, V50 с отражаемостями Zh, превышающими соответственно 35, 45 и 50 дБЗ.

Осадки из «северного» облака по радиолокационным измерениям начались на 20-й минуте, но их интенсивность была невелика (рис. 5). Интенсивность осадков определялась по усовершенствованной методике, предусматривающей определение коэффициентов в соотношении $Z = aI^b$ по непосредственным измерениям интенсивности осадков с помощью наземных осадкомеров (Попов, Синькевич, 2017). К 20—30-й мин произошло их существенное усиление, максимальная интенсивность согласно радиолокационным измерениям была равна $I_r = 22$ мм/ч. Она плавно увеличивалась до 28 мм/ч на 50-й минуте, когда из облака начал выпадать град. На 50—60-й минутах развития зафиксированы осадки из «южного» облака, максимальная интенсивность была выше, чем из «северного» и достигала 45 мм/ч (60-я минута). После слияния облаков

(70-я минута) происходит некоторое уменьшение интенсивности осадков, но уже через 10 минут (80-я минута) их интенсивность достигает абсолютного максимума, равного 77 мм/ч. Данные поляризационных измерений показывают, что выпадают смешанные осадки, в которых присутствуют частицы града. Значение максимальной интенсивности увеличилось в 1,7 раза.

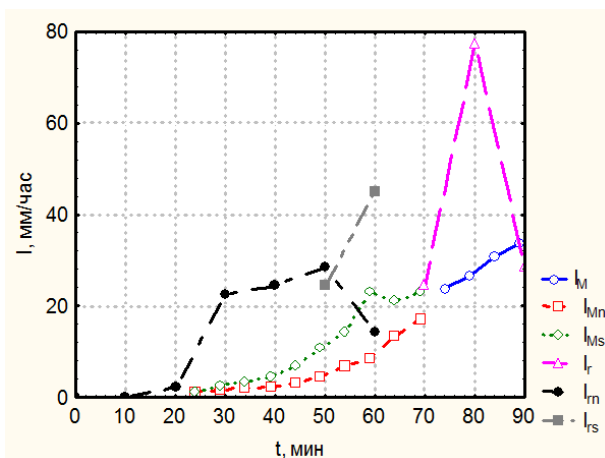


Рис. 5. Изменение во времени максимальной интенсивности осадков I .

Оценки максимальной интенсивности осадков I_M по радиометрическим измерениям также показывают увеличение интенсивности осадков после слияния облаков (методика оценки интенсивности осадков по результатам измерений со спутника Метеосат приведена в работе Крауса и др. (2012б)). Это увеличение составило 1,6 раза по отношению к максимальной интенсивности перед слиянием облаков. Здесь следует указать, что максимальная интенсивность осадков, рассчитанная по данным радиометрических измерений, была заметно меньше той, которая получена по радиолокационным данным для периода перед слиянием облаков.

Сразу после слияния они оказались примерно равны между собой. Причина расхождений аналогична обсуждавшейся при сравнении высоты верхней границы облаков, полученной по радиолокационным и радиометрическим измерениям. Кроме того известно, что радиолокационный метод измерений интенсивных осадков имеет значительные погрешности, особенно при наличии града (Краус и др., 2012б). Большие погрешности определения интенсивности осадков также характерны для спутникового радиометрического зондирования.

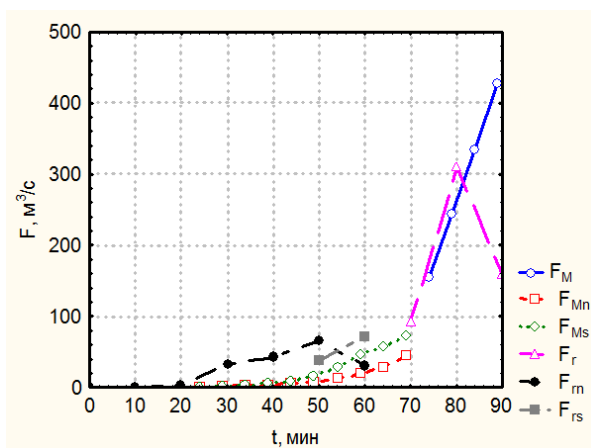


Рис. 6. Изменение во времени потока осадков F.

При анализе развития облаков большой интерес представляют интегральные характеристики облака, которые, по мнению ряда авторов (Абшаев, Малкарова, 2006; Абшаев и др., 2017), являются более информативными, чем максимальные значения. Рассмотрим, как изменялся поток осадков F (рис. 6). Отметим, что из кучево-дождевых облаков выпадает громадное количество осадков, которое исчисляется сотнями тонн в секунду. Ход кривых во времени для «северного» и «южного» облаков аналогичен соответствующим кривым для максимального значения интенсивности осадков до

момента слияния. После слияния облаков поток осадков существенно увеличивается, как по радиолокационным измерениям, так и по расчетам с использованием радиометрических данных. При этом значения потока по радиометрическим данным оказываются больше, чем по радиолокационным. В целом, после слияния поток осадков увеличился по отношению к суммарному потоку осадков от облаков перед слиянием по радиолокационным и радиометрическим данным в 2,3 и 3,6 раза соответственно. Такое увеличение потока осадков соответствует нашим результатам, полученным для Саудовской Аравии, где среднее значение увеличения потока осадков было равно 2,2 раза (Краус и др., 2012а; Sinkevich, Krauss, 2014).

Заключение

Представлены результаты анализа изменений характеристик кучево-дождевых облаков при их слиянии в районе Санкт-Петербурга, полученные по данным измерений поляризационного радиолокатора ДМРЛ-С и радиометра SEVERI, установленного на спутнике Метеосат.

Выявлено существенное «завышение» высоты верхней границы облаков по данным радиолокационных измерений по сравнению с измерениями с помощью радиометра SEVERI. Одной (но не единственной) из причин расхождений является влияние боковых лепестков диаграммы направленности антенны радиолокатора.

Слияние облаков резко изменяет временной тренд исследуемых характеристик. В результате слияния по данным радиолокационных измерений отмечается увеличение высоты верхней границы облака на 2 км, на 7,5 дБZ увеличилась максимальная отражаемость от облака, в 2—3 раза увеличился объем переохлажденной части, имеющей повышенные значения отражаемости. Максимальная интенсивность осадков по радиолокационным измерениям и рассчитанная по радиометрическим данным увеличилась в 1,5—2 раза, а поток осадков в 2—4 раза. После слияния облаков происходит усиление формирования града.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 16-05-00197_а, 17-05-00965_а, БРИКС_т 18-55-80020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Аджиев А. Х., Садыхов Я. А., Чочаев А. Б., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П. (2017). Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках // Труды ГГО. Вып. 586. С. 93—116.

Абшаев М. Т., Малкарова А. М. (2006). Оценка эффективности предотвращения града. — СПб: Гидрометеиздат. 280 с.

Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике (2017). — М.: Росгидромет. 121 с.

Краус Т. В., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Макитов В. С., Степаненко В. Д. (2011). Комплексное исследование характеристик кучево-дождевого облака, развивавшегося над Аравийским полуостровом в условиях большого дефицита точки росы в атмосфере. Часть 1. Натурные наблюдения и численное моделирование // Метеорология и гидрология. № 2. С. 44—59.

Краус Т. В., Синькевич А. А., Гхулам А. С. (2012а). Радиолокационные исследования слияния облаков // Метеорология и гидрология. № 9. С. 42—57.

Краус Т. В., Синькевич А. А., Гхулам А. С. (2012б). Измерение осадков высокой интенсивности дистанционными методами // Метеорология и гидрология. № 7. С. 15—27.

Попов В. Б., Синькевич А. А. (2017). Исследование слияния конвективных облаков на северо-западе России // Труды ГГО. Вып. 585. С. 39—55.

Синькевич А. А. (2001). Конвективные облака северо-запада России. — Л.: Гидрометеиздат. 106 с.

Синькевич А. А., Краус Т. В., Степаненко В. Д., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Пивоварова Л. В. (2009). Исследование динамики наковальни кучево-дождевого облака большой вертикальной протяженности // Метеорология и гидрология. № 12. С. 5—17.

Changnon S. A. (1976). Effects of urban areas and echo merging on radar echo behavior // J. Appl. Meteor. V. 15. P. 561—570.

Danhong F., Xueliang G. A. (2006). Cloud-resolving Study on the Role of Cumulus Merger in MCS with Heavy Precipitation // Advances in atmospheric sciences. V. 23. № 6. P. 857—868.

Kogan Y. L., Shapiro A. (1996). The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger // *J. Atmos. Sci.* V. 53. P. 2525—2545.

Kumjian M. R. (2013). Principles and applications of dual-polarization radar. Part II: Warm- and cold-season applications // *J. Operational Meteor.* V. 1. № 20. P. 243—264.

Matrosov S. Y., Cifelli R., Gochis D. (2013). Measurements of heavy convective rainfall in the presence of hail in flood-prone areas using an X-band polarimetric radar // *J. Appl. Meteor. Climatol.* V. 52. P. 395—407.

Pozo D., Borrajero I., Marín J. C., Raga G. B. (2006). A numerical study of cell merger over Cuba. Part II: Sensitivity to environmental conditions // *Ann. Geophys.* V. 24. P. 2793—2808.

Ryzhkov A., Kumjian M., Ganson S., Khain A. (2013). Polarimetric radar characteristics of melting hail. Part I: Theoretical simulations using spectral microphysical modeling // *J. Appl. Meteor. Climatol.* V. 52. P. 2849—2870.

Simpson J., Westcott N. E., Clerman R. J., Pielke R. A. (1980). On cumulus mergers // *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim.* V. 29A. P. 1—40.

Sinkevich A. A., Krauss T. W. (2014). Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging // *J. Atmos. Res.* V. 142. P. 124—132.

Wiggert V. G., Lockett J., Ostlund S. S. (1981). Rainshower growth histories and variations with wind speed, echo motion, location and merger status // *Mon. Wea. Rev.* V. 109. P. 1467—1494.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
РАЗРЯДОВ С РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ МНОГОЯЧЕЙКОВОГО
КУЧЕВО-ДОЖДЕВОГО ОБЛАКА**

А. А. Синькевич¹, Ю. П. Михайловский¹, А. М. Абшаев²

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: sinkevich51@mail.ru

² НПЦ «Антиград»
360004 Нальчик, ул. Чернышевского, 198

Поступила в редакцию 8.11.2018
Поступила после доработки 4.12.2018

Введение

Исследования в области атмосферного электричества в значительной степени направлены на изучение процессов генерации и пространственно-временного перераспределения зарядов в грозовых облаках. При этом большое внимание уделялось и уделяется разработке методов прогноза грозоградовых облаков (Абшаев и др., 2014; Федченко и др., 1991; Сулаквелидзе и др., 1970).

Эти методы в своем большинстве связывают параметры неустойчивости атмосферы с возможностью появления грозовых облаков. Важное практическое значение имеют вопросы прогноза и диагноза опасных явлений погоды, связанных с конвективными облаками в целом и электрическими явлениями в частности. Делаются попытки использования характеристик облаков, получаемых дистанционными методами, для контроля электрических явлений в облаках. Перспективным представляется изучение возможности использования электрических характеристик, например разрядов

молний, для прогнозирования других опасных явлений природы, таких как град, сильные ливни, шквалы и др.

И. М. Имянитов полагал, что электрические силы могут оказывать влияние на осадкообразование, равносильное увеличению водности в облаке на порядок (Имянитов и др., 1971). Результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в ГГО, подтвердили обоснованность этих предположений (Михайловский, 2013; 2015; 2016).

Появление электрических зарядов в облаках и последующих электрических разрядов тесно связано с микрофизическими и динамическими процессами (Шишкин, 1964). Установлено, что появление в конвективных облаках кристаллической фракции в результате активных воздействий сопровождается увеличением напряженности электрического поля (Бекряев и др., 1987; Синькевич, 2001). Усиление (ускорение) осадкообразования, в свою очередь, интенсифицирует электризацию облака. Понимание происходящих при этом процессов позволит совершенствовать методики активных воздействий.

Ранее нами был выполнен анализ развития одноячейкового кучево-дождевого облака с грозой, и получены корреляционные связи характеристик электрических разрядов и радиолокационных характеристик облака (Синькевич и др., 2017; Михайловский и др., 2017). Исследуемое облако развивалось южнее метеорологической станции Минеральные Воды.

В том же районе 12 июня 2015 года наблюдалось развитие многоячейкового кучево-дождевого грозового облака, на которое были проведены воздействия с целью предотвращения града. В процессе эксперимента радиолокатором МРЛ-5 и грозопеленгатором LS8000 измерялись радиолокационные характеристики и характеристики электрических разрядов этого облака. Результаты исследования взаимодействия ячеек в данном облаке опубликованы в работе А. М. Абшаева с соавторами (2017).

Целью настоящей работы является продолжение начатых исследований кучево-дождевых облаков (далее — Сб) для выявления взаимосвязей характеристик электрических разрядов с характери-

ками рассматриваемого кучево-дождевого облака и сравнения этих связей с теми, которые были получены ранее для одноячейкового Сб (Синькевич и др., 2017; Михайловский и др., 2017).

В настоящем исследовании анализируются данные радиолокационных измерений, полученные с помощью радиолокатора МРЛ-5 (канал 10 см), данные радиометрических измерений, полученные с использованием аппаратуры SEVERI, установленной на спутнике «Метеосат», данные измерений частоты электрических разрядов грозорегистратором LS8000.

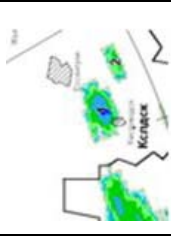
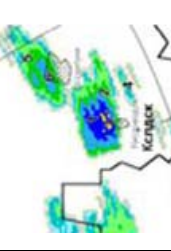
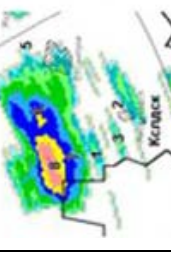
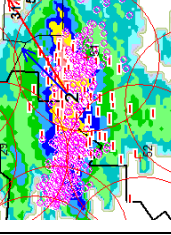
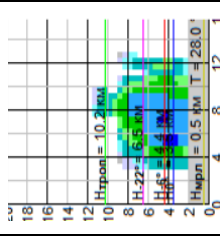
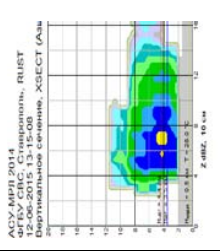
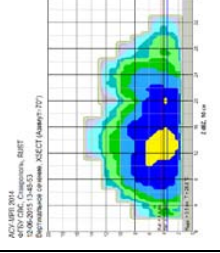
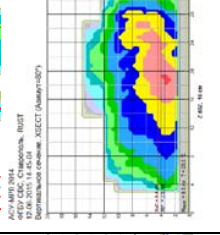
Анализ развития облака по результатам радиометрического зондирования со спутника и радиолокационным измерениям

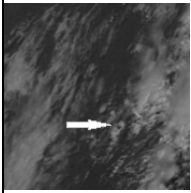
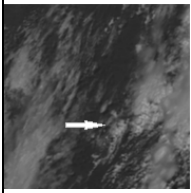
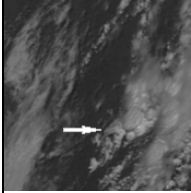
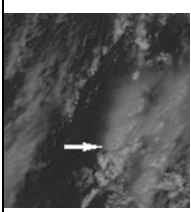
Методика измерений, характеристики используемой аппаратуры и аэросиноптические условия достаточно подробно изложены в нашей предыдущей статье (Абшаев и др., 2017). Отметим, что в рассматриваемый день погода была обусловлена прохождением холодного фронта и ложбиной южного циклона в приземном слое. Атмосфера была нестабильна, потенциальная конвективная энергия неустойчивости составляла 3086 Дж/кг. Радиоэхо облака и изображения Сб, полученные в канале высокого разрешения радиометра SEVERI, приводятся в таблице 1.

В 9 ч 42 мин ВСВ (12 ч 42 мин местного времени) спутником «Метеосат» было обнаружено мощное кучево-дождевое облако, развивавшееся вблизи Кисловодска. Это время для удобства дальнейших рассуждений примем за начало отсчета «0 мин». Облако развивалось по вертикали и на 36-й минуте начало переходить в кучево-дождевую стадию. Начало формирования наковальни хорошо видно на представленном изображении, полученном со спутника. В это же время северо-восточнее Кисловодска началось развитие второго мощного кучево-дождевого облака, которое в дальнейшем слилось с первым.

Таблица 1

Характеристики Сб в момент появления (14 и 36 мин) и во время максимальной интенсивности (70 и 126 мин)

Время, мин	14 (55)	36 (66)	70 (123)	126 (123)
Канал регистрации	VHF	LF	maxF _{VHF}	maxF _{LF}
Горизонтальное сечение радиозаха Сб				
Вертикальное сечение радиозаха Сб				

Время, мин	14 (55)	36 (66)	70 (123)	126 (123)
Изображение Сб				
F, канал VHF, мин ⁻¹	1 (4)	18	217	146
F, канал LF, мин ⁻¹		2 (3)	(448)/8	32 (23)
Z _{лп} , дБZ	41 (29)	49 (42)	59 (56)	60 (56)
H _{з_{мб}} , км	4,0 (6,0)	4,0 (3,5)	3,5 (6,5)	5,0 (6,5)
H _{вг} , км	8,5 (6,8)	10,2 (7,0)	12 (10,7)	12,8 (10,7)
T _{вг} , км	-36,8 (-24,2)	-45 (-33,0)	-49,5 (-58,9)	-51,1 (-58,9)
I, мм/час	10 (1,1)	23,8 (15,4)	86,6 (56)	66 (56)
q, кг/м ²	4,1	10,6	27,6	38,8
T _{maxdiff} , °C	-7,5	-2,6	-1,4	-0,4

Примечание.

F, мин⁻¹ — частота электрических разрядов, полученная в каналах VHF и LF;

H_{з_{мб}}, км — высота расположения уровня максимальной отражаемости; H_{вг}, км — высота верхней границы облака;

T_{вг}, °C — температура на верхней границе; I, мм/час — интенсивность осадков; q, кг/м² — приведенная водность;

T_{maxdiff}, °C — максимальное значение разности радиационных температур пикселей, полученное в каналах радиометра

SEVERI 6,2 и 10,8 мкм.

Стрелками в строке «Изображение Сб» указано положение исследуемого Сб.

В скобках приведены значения параметров для одноячейкового Сб из работ (Синькевич и др., 2017; Михайловский и др., 2017).

В период с 60-й по 94-ю минуту в облака путем запуска серий из трех противорадиолокационных ракет «Алазань-6» с частотой примерно один раз в 4 мин вносился кристаллизующий реагент, содержащий 8 % йодистого серебра. В каждую из указанных серий в облако доставлялось около 1,4 кг реагента или порядка 2×10^{16} активных льдообразующих частиц с первоначальным размером около 0,02...0,1 мкм.

Начальная концентрация частиц вдоль линий ракетного засева составляла 1010—1011 м⁻³. Воздействия производились в наветренный фланг облака, растянутый по его периферии вдоль направления навеса радиоэха.

На 75-й минуте развития облака слились и сформировали общую наковальню значительных размеров. При этом происходило их постепенное смещение в северо-западном направлении. В это же время северо-западнее рассматриваемых облаков стала развиваться новая ячейка, которая в дальнейшем на 105-й минуте слилась с исследуемыми облаками. При слиянии произошло объединение наковален.

Развитие новых конвективных ячеек к северо-западу от исследуемого облака и слияние их с основным облаком продолжалось до 135—180-й минуты. Позднее процесс формирования новых облаков стал ослабевать. К окончанию наблюдений за облаком (235-я мин) сформировалась обширная наковальня, развитие новых конвективных облаков не отмечалось.

Появление электрических разрядов

Первые внутриоблачные разряды были зарегистрированы на 14-й минуте с помощью высокочастотного канала VHF LS8000 (табл. 1). В этот момент верхняя граница облака располагалась на высоте 8,5 км ($T = -36,8$ °C). Максимальное значение отражаемости составило 41 дБZ. Максимум отражаемости располагался на высоте 4,0 км при температуре -20 °C. Такое значение отражаемости характерно для мощных кучевых облаков, однако высота верхней границы и достаточно интенсивные осадки указывают на то, что

облако начало переходить в кучево-дождевую стадию. Из облака выпадали осадки интенсивностью 10 мм/ч, приведенная водность была равна 4,1 кг/м². Таким образом, появление первых электрических разрядов отмечено в период, когда облако было уже хорошо развито. По данным радиометрических измерений в облаке присутствовали твердая, смешанная и жидкая фракции.

Через 22 минуты (на 36-й минуте развития) произошли существенные изменения в характеристиках облака: возросла отражаемость, которая составила 49 дБZ, максимальное значение отражаемости по-прежнему находилось на высоте 4,0 км, интенсивность осадков составила 23,8 мм/ч.

В этот момент с использованием низкочастотного канала LF были зарегистрированы разряды. Достаточно высокое значение отражаемости свидетельствовало о появлении крупных ледяных частиц, а радиометрические измерения указывали на наличие пикселей с кристаллической, смешанной и жидкой фракцией. Таким образом, можно полагать, что в облаке заработал механизм контактной электризации «лед—лед» и усилились коронные разряды за счет появления осадков. Все это привело к возникновению сильного электрического поля и разрядам «облако—земля» (Синькевич, Довгалюк, 2014).

Максимальная интенсивность электрических разрядов

Максимальная частота электрических разрядов была зарегистрирована на 70-й минуте развития облака с помощью канала VHF и на 126-й минуте — с помощью канала LF.

Характеристики облака на 70-й минуте. На 70-й минуте это уже было многоячейковое Сб. Частота электрических разрядов в каналах VHF и LF составила 217 и 8 мин⁻¹ соответственно (табл. 1). Отношение частоты разрядов в рассматриваемых каналах равно 27, то есть на 27 внутриоблачных разрядов приходится лишь один разряд «облако—облако» или «облако—земля». Верхняя граница Сб достигла 12 км. Максимальное значение радиолокационной отражаемости было равно 59 дБZ и располагалось на высоте 3,5 км.

Интенсивность осадков составляла 86 мм/ч по радиолокационным данным и 55 мм/ч по данным измерений со спутника.

Характеристики облака на 126-й минуте. На 126-й минуте наблюдалась максимальная частота молний (канал LF), равная 32 мин⁻¹. В это время частота электрических разрядов в канале VHF составляла 146 мин⁻¹. Отношение частоты разрядов в рассматриваемых каналах равно 4,6, что значительно меньше, чем на 70-й минуте. Верхняя граница облака находилась на высоте 12,8 км, что соответствовало ее максимальному значению. Максимальное значение радиолокационной отражаемости облака составляло 60 дБZ и располагалось на высоте 5,0 км. Максимум этой величины был зафиксирован через 24 мин и был равен 63 дБZ. Интенсивность осадков составляла 66 мм/ч по данным измерений спутника «Метеосат». При этом по радиолокационным критериям град из данного облака начал выпадать на 108-й минуте.

На 126-й минуте был достигнут максимум в разности температуры в канале радиометра SEVERI 6,2 и 10,8 мкм, которая составила 0,9 °С. Известно, что данная величина характеризует развитие кучево-дождевых облаков в вертикальном направлении: большим значениям соответствует большая скорость роста вершины (Синькевич и др., 2013; Inoue, 1987). Измерения со спутника «Метеосат» показали, что за весь рассматриваемый период в облаке присутствовали кристаллическая, смешанная и жидкая фракции.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что максимальная частота внутриоблачных электрических разрядов наблюдается в период развития Сб, а максимальная частота молний — после достижения облаком зрелой стадии развития. При этом из облака выпадали ливневые осадки. Радиолокационные критерии показывают, что периоду максимума частоты разрядов в VHF-диапазоне соответствуют ливневые осадки, а максимуму частоты разрядов в LF-диапазоне — наличие града.

Наличие разрядов свидетельствует о том, что напряженность электрического поля в облаке достигла пробойного значения. Частота разрядов является достаточно высокой, что указывает на происходящие в облаке активные процессы электризации. Можно

предположить, что существенный вклад в электризацию вносит механизм заряжения, связанный с разделением зарядов при контактах «кристаллы—крупы» в присутствии жидкой фракции. Учитывая столь высокую частоту разрядов и интенсивные осадки, значительный вклад в электризацию облака могут вносить и коронные разряды, которые возникают на отдельных градовых частицах, крупных кристаллах, а также при сближении частиц осадков (Синькевич, Довгалюк, 2014).

Сопоставление условий появления электрических разрядов в одноячейковом и многоячейковом Сб

Сравним характеристики рассматриваемого многоячейкового Сб с характеристиками одноячейкового Сб, в котором наблюдалась гроза. Ранее для данного района выполнены исследования такого Сб (Синькевич и др., 2017; Михайловский и др., 2017). С этой целью в табл. 1 добавлены характеристики одноячейкового облака. Из таблицы видно, что промежуток времени между появлением разрядов в VHF- и LF-диапазонах грозопеленгатора для нашего случая составил 22 мин. В случае одноячейкового Сб он был равен 11 мин. Промежуток времени между первыми VHF и LF разрядами и максимум частоты этих разрядов равны соответственно 56 и 90 мин для многоячейкового облака и 68 и 57 мин для одноячейкового. Таким образом, через 10—20 мин после регистрации внутриоблачных разрядов появляются молнии, и примерно через 1—1,5 ч частота электрических разрядов достигает своего максимума.

Максимальная частота внутриоблачных разрядов в многоячейковом облаке была примерно вдвое меньше, чем в одноячейковом, а частота молний — примерно в 1,5 раза. Мощность многоячейкового облака была заметно больше мощности одноячейкового в момент появления как внутриоблачных разрядов, так и молний (примерно на 2 км). Максимальная отражаемость в облаках также отличалась: в многоячейковом облаке она в момент появления разрядов превосходила ту, которая фиксировалась в одноячейковом, на 7—12 дБZ. В момент фиксации максимальных значений частоты электрических разрядов она была близка к 60 дБZ

в обоих облаках. Температура на верхней границе облаков в момент появления электрических разрядов находилась в диапазоне от $-24,2$ до $-45,0$ °С, а в момент максимальной частоты разрядов — в диапазоне от $-49,5$ до $-58,9$ °С. Столь низкие температуры на верхней границе облака указывают на наличие ледяной фракции в облаке, что способствует его электризации. Интенсивность осадков в момент появления внутриоблачных разрядов в облаках была относительно малой и не превосходила 10 мм/ч. Однако она существенно увеличилась к моменту появления молний, что может указывать на начало электризации облака не только за счет контактной электризации, но и за счет появления коронных разрядов.

В работах Ю. П. Михайловского (2015, 2016) было показано, что параметры электрических разрядов тесно связаны с интегральными радиолокационными параметрами, характеризующими количество крупных ледяных частиц в облаке. К таким параметрам относятся и объем переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ (dV_{35} , км³). Рассмотрим зависимость частоты разрядов от dV_{35} .

Для целей сверхкраткосрочного прогноза особый интерес представляет стадия развития. Поэтому для одноячейкового облака были определены связи частоты электрических разрядов в LF- и VHF-диапазоне с объемом переохлажденной части с отражаемостью более 35 дБZ на стадии развития. Они имеют следующий вид:

$$F_{LF} = -0,21 + 0,031 dV_{35}, \quad r = 0,81;$$

$$F_{VHF} = -25,5 + 0,55 dV_{35}, \quad r = 0,82.$$

Для исследуемого многоячейкового облака эти корреляционные зависимости могут быть представлены формулами:

$$F_{LF} = -1,2 + 0,0084 dV_{35}, \quad r = 0,90;$$

$$F_{VHF} = -37 + 0,19 dV_{35}, \quad r = 0,86.$$

Анализ показал, что связь между этими характеристиками лучше описывается квадратичной зависимостью, в этом случае формулы имеют вид:

$$F_{LF} = -0,31 + 0,002 dV_{35} + 0,0000065 (dV_{35})^2;$$

$$F_{VHF} = 11 - 0,16 dV_{35} + 0,00012 (dV_{35})^2.$$

График соответствующих зависимостей представлен ниже. Из сравнения представленных рисунков и регрессионных уравнений видно, что исследуемые связи частоты электрических разрядов с объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБЗ существенно различаются. Одноячейковое облако генерирует в несколько раз больше разрядов, чем многоячейковое, имеющее одинаковую с ним переохлажденную часть с отражаемостью более 35 дБЗ. Если сравнить значения радиолокационных характеристик в моменты, когда отмечались максимумы в частоте электрических разрядов, то можно отметить, что они не сильно отличаются для обоих облаков.

При этом частота электрических разрядов в одноячейковом облаке в 2 раза выше (максимумы частоты в нем в диапазонах LF и VHF совпали по времени). Существенно (более чем в 3 раза) отличаются также средние скорости увеличения частот электрических разрядов за время от их появления до достижения максимальных значений.

Таким образом, на основании анализа развития этих облаков можно сделать вывод о том, что выбранное одноячейковое облако более электрически активно, чем многоячейковое, имеющее аналогичные суммарные переохлажденные части. Если прогнозировать молниевую активность многоячейкового облака в целом по радиолокационным данным, эту особенность необходимо учитывать. Возможно, это связано с эффектом конкуренции ячеек в многоячейковом облаке за имеющиеся атмосферные ресурсы (влага, энергия неустойчивости) и, как следствие, их ослаблением, что отмечено, например, в работе Г. С. Бурундукова с соавторами (2011).

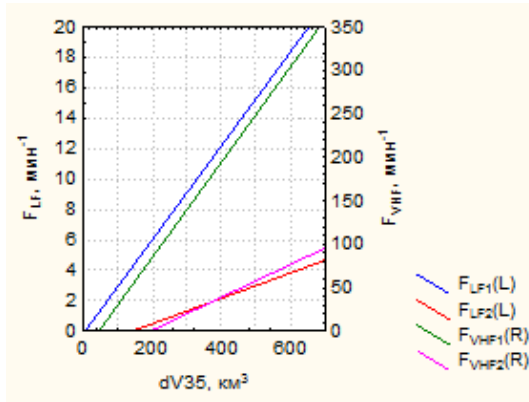


Рис. 1. Зависимость частоты электрических разрядов в низко- и высокочастотном диапазонах от объема переохлажденной части многоячейкового облака на стадии развития.

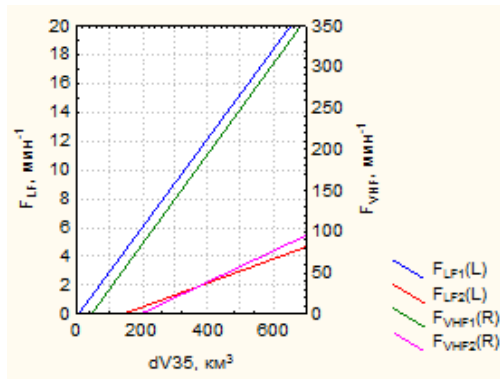


Рис. 2. Корреляционные зависимости частоты электрических разрядов в низко- и высокочастотном диапазонах от объема переохлажденной части одноячейкового (F_{LF1} , F_{VHF1}) и многоячейкового (F_{LF2} , F_{VHF2}) Сб на стадии развития.

Исследование связей молниевой активности отдельных ячеек с их радиолокационными параметрами и возможного влияния электрических полей соседних облаков планируется на будущее. Необходимо отметить, что эти выводы сделаны на основании анализа развития двух облаков, которые располагались в одном районе. Важным является то, что для изучения облаков использовался один и тот же комплекс приборов.

Для многоячеековых облаков, как и для одноячеековых, наблюдается тесная корреляционная связь частот электрических разрядов в LF- и VHF-диапазонах с dV_{35} , коэффициент корреляции между указанными характеристиками равен 0,90 и 0,86 соответственно.

Влияние воздействий на электрические характеристики

Ставропольской противоградовой службой проводилось воздействие на изучаемое облако. С 60-й по 94-ю минуту в облако вносился кристаллизующий реагент. Этот период выделен красными треугольниками (2) на горизонтальной оси (рис. 3).

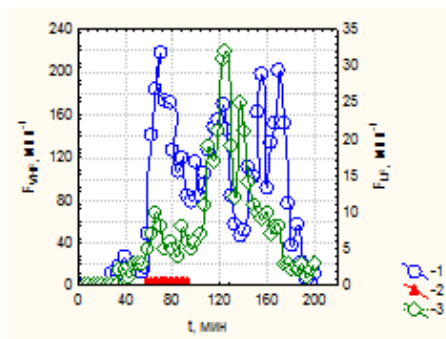


Рис. 3. Изменение частот электрических разрядов F_{VHF} (1) и F_{LF} (3); красная горизонтальная линия (2) указывает на период времени, когда проводились воздействия.

Видно, что увеличение F_{VHF} началось сразу после начала воздействий и достигло максимума через 10–15 мин. Через 30 мин после окончания воздействий отмечен максимум частоты молний (F_{LF}). Учитывая, что время формирования осадков после воздействий составляет около 20—30 мин, появление этого максимума может быть связано с разделением зарядов в облаке за счет осадков. Однако этот вывод требует проверки на большем статистическом материале.

Измерение токов молний осуществлялось в LF-диапазоне. На 10-й минуте после воздействий наблюдалось резкое увеличение как максимальных (I^+_{max} более 100 кА/мин), так и средних (I^+ более 40 кА/мин) суммарных положительных токов. Вторичные максимумы этих токов отмечались на 155-й и 200-й минутах эксперимента.

Примерно через 10 мин после воздействий наблюдался рост средних суммарных токов отрицательных молний (преимущественно молний «облако—земля», переносящих на землю отрицательный заряд). Максимальное значение этого параметра (166 кА/мин) отмечалось на 126-й минуте эксперимента, приблизительно через 29 минут после окончания воздействий.

Таким образом, увеличение частоты электрических разрядов, зафиксированных системой LS8000 в коротковолновом диапазоне частот F_{VHF} , началось сразу после начала воздействий и достигло максимума через 10—15 мин, еще до окончания воздействий.

Выводы

Выполнено детальное исследование развития грозоградового кучево-дождевого облака с помощью данных, полученных с использованием дистанционных средств измерений (радиолокатора, грозопеленгатора и радиометра).

Первые внутриоблачные разряды появились в облаке в момент времени, когда верхняя граница располагалась на высоте 8,5 км ($T = -36,8$ °С). Максимальное значение отражаемости составило 41 дБЗ. Такое значение отражаемости характерно для мощных кучевых облаков, однако высота верхней границы и достаточно интенсивные осадки указывают на то, что облако начало переходить

в кучево-дождевую стадию. Из облака выпадали осадки интенсивностью 10 мм/ч. Таким образом, появление первых электрических разрядов отмечено в период, когда облако было уже хорошо развито. Первые молнии наблюдались в момент, когда произошли существенные изменения в характеристиках облака: возросла отражаемость, которая составила 49 дБЗ, интенсивность осадков равнялась 23,8 мм/ч. Достаточно высокое значение отражаемости свидетельствовало о появлении крупных ледяных частиц.

Максимальная частота электрических разрядов была зарегистрирована на 70-й минуте развития с помощью канала VHF. В это время облако уже было многоячейковым. Частота электрических разрядов составила соответственно 217 мин^{-1} на 27 внутриоблачных разрядов приходился лишь один разряд «облако—облако» или «облако—земля». Верхняя граница Сб достигла 12 км. Максимальное значение радиолокационной отражаемости было равно 59 дБЗ. Интенсивность осадков составляла 86 мм/ч.

Максимальная частота молний (канал LF) наблюдалась на 126-й минуте развития и была равна 32 мин^{-1} . В это время на 4,6 внутриоблачных разрядов приходится лишь один разряд «облако—облако» или «облако—земля». Верхняя граница облака находилась на высоте 12,8 км, что соответствовало ее максимальному значению. Максимальное значение радиолокационной отражаемости по облаку было равно 60 дБЗ. Интенсивность осадков составляла 66 мм/ч.

Радиолокационные критерии показывают, что периоду максимума частоты разрядов в VHF-диапазоне соответствуют ливневые осадки, а максимуму частоты разрядов в LF-диапазоне — наличие града. Наблюдается тесная корреляционная связь частот электрических разрядов в LF- и VHF-диапазонах с dV_{35} , коэффициент корреляции равен 0,90 и 0,86 соответственно.

Сравнение характеристики рассматриваемого многоячейкового Сб с характеристиками изученного ранее одноячейкового Сб показало, что максимальная частота внутриоблачных разрядов

в многоячейковом облаке была примерно вдвое меньше, чем в одноячейковом, а частота молний — примерно в 1,5 раза.

На изучаемое облако проводились воздействия кристаллизующим реагентом. Увеличение частоты электрических разрядов, зафиксированных системой LS8000 в коротковолновом диапазоне частот, началось сразу после начала воздействий и достигло максимума через 10—15 мин, еще до окончания серии воздействий. Через 30 минут после окончания воздействий отмечен максимум частоты молний (F_{LF}).

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 17-05-00965_а, БРИКС_т 18-55-80020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Баркова М. В., Малкарова А. М. (2014). Руководство по организации и проведению противорадовых работ. — Нальчик: Печатный двор. 508 с.

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Аджиев А. Х., Садыхов Я. А., Чочаев А. Б., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П. (2017). Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках // Труды ГГО. Вып. 586. С. 93—116.

Бекряев В. И., Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А., Чубарина Е. В. (1987). Результаты исследований процесса кристаллизации конвективных облаков после воздействий / В сб.: Вопросы физики облаков. — Л.: Гидрометеиздат. С. 131—136.

Бурундуков Г. С., Потапов Е. И., Гараба И. А., Плюснин С. Д., Засавицкий Е. А., Абшаев М. Т., Абшаев А. М. (2011). Применение модели развития системы объект—ресурс для объяснения особенностей эволюции конвективного облака (конвективной ячейки) // Метеорология и гидрология. № 2. С. 88—95.

Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. (1971). Электричество облаков. — Л.: Гидрометеиздат. 93 с.

Михайловский Ю. П. (2013). Дистанционные исследования электризации конвективных облаков радиофизическими методами с использованием самолетов / В сб.: Вопросы радиометеорологии. — СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского. С. 238—252.

Михайловский Ю. П. (2015). Методика и результаты самолетных воздействий на электризацию конвективных облаков // Труды ГГО. Вып. 577. С. 197—211.

Михайловский Ю. П. (2016). О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации // Труды ГГО. Вып. 580. С. 125—138.

Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Павар С. Д., Гопалакришнан В., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Богданов Е. В., Куров А. Б., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абишев А. М. (2017). Исследования развития грозоградового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // Метеорология и гидрология. № 6. С. 31—45.

Синькевич А. А. (2001). Конвективные облака северо-запада России. — Л.: Гидрометеиздат. 106 с.

Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А. (2014). Коронный разряд в облаках // Радиопизика. Т. LVI. № 11—12. С. 1—12.

Синькевич А. А., Краус Т. В., Гулам А. С., Куров А. Б. (2013). Исследование характеристик кучево-дождевых облаков большой мощности после воздействий с целью увеличения осадков // Метеорология и гидрология. № 9. С. 5—20.

Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Попов В. Б. (2017). Слияние конвективных облаков / В сб.: Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. — Нальчик: Изд. АЭТЕРНА. С. 141—146.

Сулаквелидзе Г. К., Глушкова Н. И., Федченко Л. М. (1970). Прогноз града, гроз и ливневых осадков. — Л.: Гидрометеиздат. 183 с.

Федченко Л. М., Гораль Г. Г., Беленцова В. А., Мальбахова Н. М. (1991). Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. — М.: Гидрометеиздат. 425 с.

Шишкин Н. С. (1964). Облака, осадки и грозовое электричество. — Л.: Гидрометеиздат. 351 с.

Inoue T. A. (1987). Cloud type classification with NOAA 7 split-window measurements // Journal of Geophysical Research. V. 92. № D4. P. 3991—4000.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫМИ ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРАМИ

А. В. Снегуров, В. С. Снегуров

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: info@alwes.ru

Поступила в редакцию 19.11.2018
Поступила после доработки 17.12.2018

Введение

Начиная с 1920-х годов в пеленговании грозовых разрядов применялись двухканальные пеленгаторы с рамочными антеннами (Watson-Watt, Herd, 1926). Для отображения данных использовались электронно-лучевые индикаторы, на которые подавался узкополосный сигнал с усилителей пеленгаторов. Позже неоднозначность исключалась с помощью сигнала третьего приемника, подключенного к электрической антенне (Stoffregen, 1947).

Аналогичный принцип построения узкополосных амплитудных пеленгаторов использовался в отечественной практике до конца 1980-х годов (Асташенко, Махоткин, 1963; Махоткин, 1997; Бару и др., 1976; Гальперин, 1965, 1966; Гальперин и др., 1967, 1988; Махоткин, Иньков, 1980; Кашпровский, 1966; Кононов и др., 1986).

К узкополосным методам пеленгования гроз относятся методы, в которых используются соотношения амплитуд, сумм или разностей фаз между узкополосными сигналами двух рамочных (ферритовых) антенн, расположенных в перпендикулярных плоскостях и ориентированных в направлениях север—юг (ось ОУ) и восток—запад (ось ОХ).

Неоднозначность в определении направления исключается путем определения знаков полуволн электрической и магнитной составляющих поля. Эта процедура, являющаяся наиболее трудной, связана с измерением относительных изменений фаз узкополосных сигналов электрической и магнитной компонент поля, которые зависят от расстояния, пространственной ориентации каналов молний и динамических перегрузок в измерительных каналах (Гальперин, 1965, 1966; Гальперин и др., 1967, 1988; Кононов и др., 1986; Снегуров, 1985, 1988; Снегуров, Семагин, 1980; Снегуров, Ардатов, 1985, 1986; Ардатов и др., 1991; Snegurov, 1992). Одна из модификаций узкополосного пеленгатора использовалась в грозопеленгаторе ПАГ-1, работающем на частотах около 7 кГц (Гальперин и др., 1967). По данным экспериментальных исследований в «линиях Пащенко» максимальная погрешность измерения пеленга ПАГ-1 составляла 7° , а средняя квадратическая — 3° (Гальперин и др., 1971). Узкополосные модификации амплитудных грозопеленгаторов (рабочие частоты около 7 кГц) использовались в грозопеленгационных сетях Гидрометеослужбы СССР в 1950—1970 годы, промышленных образцах автономного грозопеленгатора-дальномера (АГПД) «Очаг 2П», однопунктовых грозопеленгаторов-дальномеров (ОГПД) «ФАГ-1» и опытных образцах «Оранже» и «Молния-1».

Цель настоящей работы состоит в экспериментальной оценке погрешности измерения азимута низкочастотным узкополосным и широкополосными амплитудными пеленгаторами с помощью имитаторов и многопунктовой грозопеленгационной системы (ГПС) Росгидромета, развернутой в 2008—2015 гг. на ЕТР и Урале (Снегуров, Снегуров, 2017).

Теоретические и экспериментальные данные

Измеренное значение пеленга можно представить некоторым средним значением $\bar{\varphi}$, которое включает в себя истинное значение пеленга на источник излучения φ и систематическую погрешность

измерений φ_s с дисперсией σ_Σ^2 (случайной погрешностью измерений):

$$\bar{\varphi} = \varphi + (\varphi_s \pm \sqrt{\sigma_\Sigma^2}) . \quad (1)$$

Систематическая погрешность φ_s измерений обусловлена неточностью установки антенн пеленгаторов, «погрешностью пункта» φ_{se} , обусловленной влиянием окружающих предметов и сооружений, неидентичностью каналов приемников пеленгаторов. Случайные погрешности появляются в результате влияния пространственной ориентации канала молнии (поляризации) σ_{m_0} , аппаратурной ошибки $\sigma_{ап}$, обусловленной неточностью аналого-цифрового преобразования, нарушения динамического диапазона измерений и наличия шумов $\sigma_{ш}$. Таким образом, суммарная случайная погрешность может быть представлена следующим соотношением:

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_{m_0}^2 + \sigma_{ап}^2 + \sigma_{ш}^2 . \quad (2)$$

Теоретическая оценка поляризационных погрешностей для узкополосных амплитудного и амплитудно-фазового пеленгаторов (НН-вариант) показала, что при отклонении диполя от вертикали не более чем на 45° с удалений более 30 км σ_{m_0} не превышает 5° (Кононов и др., 1986). Для ЕН-варианта узкополосного пеленгатора погрешность складывается из двух составляющих. Первая не зависит от частоты, определяется только наклоном излучателя и имеет период, кратный π . При наклоне излучателя на 45° эта составляющая погрешности уменьшается от 86° на удалении 3 км до 2° на удалении более 50 км. Если сравнивать погрешности НН-варианта и ЕН-варианта пеленгаторов, то σ_{m_0} у первого в 3—5 раз меньше, чем у второго. Расчеты показывают, что чем выше частота, тем быстрее убывает погрешность измерений по мере увеличения расстояния. Например, на частоте 1 кГц σ_{m_0} достигает нескольких десятков

градусов на удалении до 40—50 км, а на частоте 10 кГц она не превышает 3—5° уже на удалении более 15—20 км. На погрешности пеленгаторов с амплитудно-фазовым преобразованием заметное влияние оказывает неидентичность каналов. В ЕН-варианте пеленгатора неидентичность электрического канала прямо пересчитывается в погрешность измерения пеленга. Фазовая неидентичность каналов, формирующих суммарный сигнал, сказывается в меньшей степени. Максимальное значение погрешности наблюдается при пеленгах 0 и 180 градусов. В НН-варианте пеленгатора максимальная погрешность наблюдается при углах, кратных 22,5, но при этом почти в 10 раз меньше, чем в ЕН-варианте.

Результаты измерений пеленга в зоне до 10—15 км с помощью амплитудного пеленгатора и данные визуальных наблюдений выявили расхождение в 5° (Асташенко, Махоткин, 1963). Позднее были получены данные синхронных измерений пеленгов в ближней зоне с помощью амплитудного и амплитудно-фазового (ЕН-вариант) пеленгаторов (Махоткин, Иньков, 1980), которые показали, что на удалении около 6 км расхождение в показаниях двух пеленгаторов достигало 50°, на удалении 9 км — 25°, а на промежуточных расстояниях 30—40°. Синхронные измерения направления на молниевые разряды амплитудно-фазовым пеленгатором и разностно-дальномерной системой местоопределения гроз позволили оценить погрешность пеленгования на расстояниях 25, 63, 75, 93, 95 и 175 км от грозových очагов (Кононов и др., 1986). Средняя квадратическая погрешность не зависела от расстояния и составила 6 градусов.

За рубежом узкополосные пеленгаторы, например (Muller-Hillebrand, 1962), использовались до появления в середине 1970-х годов широкополосного пеленгатора (Kridler et al., 1976). Для определения пеленга в широкополосном варианте использовались максимальные (пиковые) значения амплитуд магнитного поля, наведенного на рамочные антенны в полосе частот от 1 до 1000 кГц. Основная идея применения широкополосных устройств, менее защищенных от помех, чем узкополосные, заключалась в проведении измерений на переднем фронте атмосферика, длительность которого не превышает десятка микросекунд. Считается, что длина канала

обратного удара молнии не превышает нескольких сотен метров, а сам канал расположен вертикально (Uman et al., 1980). Такой подход к измерению пеленга позволяет исключить возможные поляризационные ошибки (σ_{m_0}) и повысить точность пеленгации гроз.

Результаты сравнения данных широкополосного пеленгатора и телевизионной камеры показали, что в среднем погрешность составила 2 градуса, а среднее квадратическое отклонение — около 2...3 градусов (Herman et al., 1976; Krider et al., 1976). Сравнительно низкие значения погрешности пеленгования в этом случае можно объяснить малыми значениями угла отклонения от вертикали канала молнии и измерением амплитуд магнитного поля на переднем фронте, когда высота обратного удара молнии не превышает 200—300 метров.

В отечественной практике широкополосные пеленгаторы для определения пеленга в ближней (до 200—300 км) зоне появились в начале 1990-х годов.

Переход от узкополосных методов измерений пеленга к широкополосному повышает быстродействие пеленгатора. Время анализа широкополосных сигналов на порядок меньше, чем узкополосных. Увеличение быстродействия пеленгатора дает возможность регистрировать повторные удары молний в землю, что значительно повышает эффективность наблюдений. Кроме того, проводя измерения на переднем фронте сигнала, в ближней зоне практически исключается влияние сигнала, отраженного от ионосферы.

Как отмечалось выше, источниками случайной погрешности измерений могут быть аппаратурная, обусловленная нарушением динамического диапазона измерений и аналого-цифровым преобразованием, поляризационная, определяемая пространственной ориентацией канала молнии, и погрешность, вызванная промышленными шумами. Динамические перегрузки измерительных каналов усилителей контролируются программными средствами и исключаются при обработке исходных данных. Для уменьшения погрешности аналого-цифрового преобразования и влияния шумов

выбираются многозарядные аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Предварительно ведется подбор порогов запуска устройств синхронизации измерений, при которых соотношение сигнал / шум максимально. По расчетным данным, погрешность измерения пеленга широкополосным пеленгатором в один градус обеспечивается при соотношении сигнал / шум, превышающем 100 (Кононов и др., 1986). По разным оценкам (например, Frisius et al., 1984), уже с расстояний 80—100 км начинает сказываться влияние кривизны поверхности Земли и ионосферы, что выражается в появлении искажений амплитудно-частотных и фазовых характеристик сигнала, излучаемого молниевым разрядом. Наблюдается «завал» переднего фронта волновой формы ЭМИ молниевое разряда и увеличение амплитуды второй полуволны. Это в определенной степени сказывается на погрешности выделения первого максимума в волновой форме ЭМИ (атмосферика) и приводит к увеличению погрешности измерения пеленга с помощью широкополосных грозопеленгаторов и ошибкам определения времени прихода сигналов ЭМИ молний в территориально разнесенные пункты разностно-дальномерной системы.

В начале 1990-х годов была разработана одна из первых отечественных широкополосных модификаций грозопеленгатора на базе микропроцессора (рабочие частоты от 1 до 100 кГц). Грозопеленгатор использовался в индикаторных устройствах ОГПД версии «Алвес 01», «Alwes 2.1», позднее — на базе промышленных компьютеров «Alwes 7.01» грозопеленгационной системы «Алвес 3.2.801», установленной на космодроме Байконур. Модернизированная версия широкополосного пеленгатора на базе микроконтроллеров используется в современных ОГПД — индикаторных устройствах «Alwes 7.04.2» и ГДА-1 (Снегуров и др., 1990; Snegurov, 1992; Огуряева и др., 2001; Снегуров, 2005).

Результаты лабораторных экспериментов

На первом этапе экспериментов была проведена серия лабораторных измерений, цель которых состояла в оценке рассогласования показаний пеленгаторов с различным аппаратным и программным обеспечением по сигналам двух имитаторов. Первый имитатор генерировал широкополосный сигнал с длительностью переднего фронта 15 мкс, второй — длительностью порядка 5 мкс. Длительность сигналов имитаторов составляла 200 и 300 мкс соответственно. При проведении лабораторного эксперимента использовалась стандартная антенна узкополосного пеленгатора (рабочая частота 7 кГц) в АГПД «Очаг-2П», к которой подключались входные фильтры широкополосного пеленгатора PV. К выходам фильтров пеленгатора PV подключались входы двух пеленгаторов PG1 и PG2. В PG2 сигналы подавались непосредственно на входы АЦП, в PG1 — через режекторные фильтры и фильтры низкой частоты на АЦП. Имитаторы генерировали сигналы для трех измерительных каналов (E_z , H_x и H_y). Таким образом, для пеленгаторов общими были антенна (АГПД «Очаг-2П») и входные фильтры пеленгатора PV.

Обработка данных измерений проводилась следующим образом. После преобразования формата файлы данных с пеленгатора PV переписывались на жесткий диск центрального процессора. С помощью соответствующих программ проводилась выборка синхронно зарегистрированных сигналов с имитатора по трем пеленгаторам PV, PG1 и PG2. По данным пеленгаторов PG1 и PG2 вычислялись пеленги для «порогового» уровня 12,5 мВ. По первым трем отсчетам АЦП определялись разности средних значений между показаниями пеленгаторов PG1, PG2 и PV и стандартное отклонение (СКО) этих разностей σ_{Δ} по каждой выборке. Результаты обработки представлены в таблицах 1—2. В табл. 1 приведены СКО (σ_{Δ}) разностей пеленгов ($\varphi_{PG1} - \varphi_{PV}$) и ($\varphi_{PG2} - \varphi_{PV}$), измеренных тремя пеленгаторами по сигналам первого имитатора. Расчеты выполнены для первых трех квантующих импульсов АЦП пеленгаторов PG1 и PG2 через интервалы времени 5, 133 и 266 мкс

после прохождения синхроимпульса, сформированного передним фронтом широкополосного сигнала имитатора в канале Ez пеленгаторов. Аналогичные данные приведены в табл. 2 для случая, когда применялся второй имитатор. Следует отметить, что значение пеленга по пеленгатору PV определялось только по максимуму первой полуволны формы ЭМИ молний, в то время как пеленги по пеленгаторам PG1 и PG2 измерялись по первым трем точкам.

Таблица 1

Сравнение значений СКО разности пеленгов между показаниями пеленгаторов PG1 и PV, PG2 и PV для первых трех отсчетов АЦП (первый имитатор — длительность фронта 15 мкс)

Число случаев, n	СКО (σ_{Δ}), град.		Номер отсчета
	PG1	PG2	
388	1,0	2,3	1
428	3,0	3,8	2
370	7,8	9,8	3

Таблица 2

Сравнение значений СКО разности пеленгов между показаниями пеленгаторов PG1 и PV, PG2 и PV для первых трех отсчетов АЦП (второй имитатор — длительность фронта 5 мкс)

Число случаев, n	СКО (σ_{Δ}), град.		Номер отсчета
	PG1	PG2	
261	0,7	0,7	1
169	0,5	1,3	2
169	0,8	3,0	3

Анализ данных в табл. 1 показывает значительную зависимость величины стандартного отклонения от времени, через которое проводится измерение пеленга пеленгаторами PG1 и PG2, а во втором случае (табл. 2) эта зависимость практически отсутствует для данных

пеленгатора PG1 и менее выражена для пеленгатора PG2. Для сравнительно коротких импульсов первого имитатора (около 200 мкс) СКО разности отсчетов пеленгаторов PG1 и PV изменяется от 1,0 до 7,8°. Для более длинных импульсов (второго имитатора) — от 0,5 до 0,8°. При этом наблюдается значительное, в 6—10 раз, уменьшение σ_{Δ} . Это объясняется изменением соотношения сигнал/шум на различных участках имитируемых аналоговых сигналов. Дополнительную погрешность вносит отсутствие на входах пеленгатора PG2 режекторного фильтра и фильтра низких частот (см. данные для PG2 в табл. 1 и 2).

Аналогичные изменения следует ожидать при регистрации ЭМИ молний, длительность которых изменяется в значительных пределах. Минимальные расхождения в показаниях пар пеленгаторов PV и PG1 наблюдаются при измерениях на переднем фронте сигнала. Таким образом, блоки фильтров и АЦП пеленгатора PG1 обеспечивают измерения пеленга с аппаратурной погрешностью менее 1°. Как отмечалось выше, для измерения пеленга с погрешностью менее 1° необходимо, чтобы соотношение сигнал/шум было более 100 (Кононов и др., 1986). Как правило, это соотношение соблюдается при регистрации сигналов в ближней зоне. Исключение составляют данные регистрации гроз по азимутам 0, 90, 180 и 270°. В этих случаях по одному из измерительных каналов магнитных антенн соотношение сигнал/шум значительно ухудшается, из-за низких уровней полезных сигналов, обусловленных диаграммой направленности антенн.

При тестировании антенн и пеленгаторов с целью определения возможных аппаратурных ошибок измерения пеленга по данным имитатора, кольца Гельмгольца устанавливались на радиопрозрачный колпак блока антенн. Пеленгатор размещался на открытой площадке, приспособленной для проведения полевых работ. Конструкция позволяет устанавливать кольца таким образом, чтобы ферритовые антенны располагались по их оси. К кольцам подключался генератор прямоугольных импульсов. Частота следования импульсов генератора могла изменяться от 1 до 1000 Гц, а амплитуда сигналов от 0 до 4 В. С помощью колец была проведена серия опытов. В результате

получены распределения средних значений относительных амплитуд сигналов на выходах Ez , Hx , $Hу$ каналов и пеленгов, а также их СКО $\sigma_{(Ez,Hx,Hу)}$ для различных уровней входных сигналов на кольцах Гельмгольца. Поскольку кольца устанавливались на блок антенн, то при измерениях регистрировался суммарный сигнал, наводимый на антеннах как внешними шумами, так и с помощью колец. Таким образом, была проведена обработка данных измерений для азимутов 345 и 50°.

Полученные данные позволяют дать оценку случайной погрешности измерения пеленга, вызванной влиянием внешних шумов $\sigma_{ш}$ и аппаратурой $\sigma_{ап}$, включая полностью тракт от антенны до выходов аналого-цифровых преобразователей.

Использование быстродействующих АЦП и контроль уровня входных сигналов уменьшает вероятность появления значительных случайных ошибок $\sigma_{ап}$. В дальнейших экспериментах будем считать $\sigma_{ап}$ близким к нулю. Таким образом, основным источником ошибок при экспериментах в лабораторных условиях остается уровень шумов.

Выбор направлений 345 и 50° обусловлен тем, что в первом случае по одному из каналов амплитуда сигнала мала, почти на уровне шума, а по второму каналу близка к максимальному значению. Во втором варианте амплитуды магнитных составляющих близки по величине и при определенных уровнях сигналов имитатора значительно превышают уровень шумов. Это позволяет сравнивать значения средних и СКО ($\sigma_{ш}$) пеленгов при различных уровнях полезных сигналов по Hx , $Hу$ каналам.

В первом эксперименте изменение уровня сигнала имитатора приводит к изменению пеленга от 332° при напряжении 4,0 В до 356° при напряжении 0,1 В. СКО ($\sigma_{ш}$) также возрастает от 5 до 12,5°. Увеличение средних значений пеленга и $\sigma_{ш}$ при амплитудах сигналов имитатора менее 1,0 В объясняется тем, что уровень сигнала по $Hу$ каналу близок к нулю и соизмерим с уровнем шумов. Этого нельзя сказать о данных, полученных во втором эксперименте, когда амплитуды сигналов по Hx и $Hу$ каналам соизмеримы. Средние значения пеленга в диапазоне амплитуд входных сигналов от 0,4 до

4,0 В изменяются не более чем на 1°, а $\sigma_{ш}$ в этом диапазоне не превышает 1,3°.

В таблице 3 приведены данные зависимости СКО ($\sigma_{ш}$) измерения пеленга от соотношения сигнал / шум. При соотношении более 7 аппаратная погрешность измерения пеленга $\sigma_{ш}$ широкополосным пеленгатором не превышает 2°, а при соотношении более 25 — $\sigma_{ш} < 1^\circ$. Для определения суммарной погрешности $\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{m_0}^2 + \sigma_{ап}^2 + \sigma_{ш}^2$ (см. формулу 2) необходимо оценить влияние пространственной ориентации молниевых разрядов на погрешность измерения пеленга σ_{m_0} . Выделить эту составляющую практически не удастся. По этой причине представляет большой интерес сравнение показаний широкополосного и узкополосного пеленгаторов.

Таблица 3

Зависимость СКО пеленга ($\sigma_{ш}$) от соотношения сигнал / шум по данным испытаний с помощью имитатора

Отношение сигнал/шум	3,1	3,7	4,8	5,8	7,0	8,0	17,0	23,0	37,0
СКО ($\sigma_{ш}$), град.	4,9	4,4	4,1	3,4	2,0	1,8	1,2	1,0	0,8

Результаты полевых экспериментов

В дальнейшем регистрация грозových разрядов с помощью пеленгаторов PV и PG1 проводилась в пос. Воейково Ленинградской области. Напомним, что в пеленгаторе PG1 используется более узкая полоса рабочих частот, время преобразования 12-разрядного АЦП составляет 128 мкс, а время выборки уровня аналоговых сигналов около 5 мкс. Следовательно, первая выборка проводится через 5 мкс после появления синхросигнала, вторая и последующие через 128 мкс. Этот вариант АЦП разработан для узкополосных приемников ОГПД «Пеленг» с рабочей резонансной частотой фильтров 500 Гц. Синхронизация осуществлялась сигналами системы единого времени. После завершения цикла измерений (каждый цикл, как правило,

составлял 7—10 дней) данные регистрации пеленгаторами PV и PG1 переписывались в необходимом формате на жесткий диск центрального процессора и обрабатывались. На первом этапе проводилась выборка синхронных данных по двум пеленгаторам. Синхронными считались отсчеты, время регистрации которых не отличалось более чем на 10 мкс. При сопоставлении вычисленных по пеленгатору PG1 пеленгов с данными широкополосного пеленгатора PV вычислялись средние значения, СКО и коэффициент корреляции. Так как измерения проводились в одном пункте, величина «погрешности пункта» φ_{se} одинаково влияла на оба пеленгатора и не влияла на оценку средних значений разностей пеленгов и СКО.

Ниже остановимся на сравнении данных измерений двух пеленгаторов. Поскольку пеленгатор PG1 записывал в файлы данные оцифровки форм электрической и магнитных составляющих поля, была возможность провести вычисления пеленгов при различных «пороговых уровнях» исходных сигналов, по первому, второму и последующим 50-ти квантующим импульсам. «Пороговый уровень» устанавливался по количеству разрядов АЦП. Для данного вида АЦП младшему разряду соответствовало напряжение 2,5 мВ. При обработке данных использовались «пороговые уровни» 1, 5, 10, 25, 50 и 100. Это соответствовало напряжениям 2,5, 12,5, 25, 62,5, 125 и 250 мВ соответственно. В таблицах 4 и 5 приведены данные статистической обработки результатов измерений пеленгаторами PV и PG1.

В таблице 4 приводятся значения пеленгов по PG1, вычисленные по первому отсчету, через 5 мкс после прохождения синхросигнала, в таблице 5 — аналогичные значения пеленгов по второму отсчету, через 133 мкс. Из приведенных выше данных следует, что по мере увеличения пороговых уровней уменьшаются число зарегистрированных разрядов и СКО. В первом случае СКО изменяется от 8,1 до 5,6°, во втором случае от 11,7 до 5,8°. Так как увеличение пороговых уровней приводит к улучшению соотношения сигнал / шум, соответственно снижаются ошибки измерений пеленгатором PG1.

Таблица 4

Результаты обработки данных синхронных измерений пеленгов пеленгаторами PV и PG1 (вычисления пеленга по первому отсчету PG1)

Пороговый уровень, мВ	Число синхронных измерений, n	n/528, %	Среднее значение разности пеленгов, град.	СКО, град.	Коэффициент корреляции
2,5	528	100	1	8,1	0,97
12,5	459	87	2	7,3	0,97
25,0	426	81	2	7,1	0,98
62,5	317	60	1	6,1	0,98
125,0	212	40	1	5,6	0,98
250,0	114	22	1	5,7	0,98

Таблица 5

Результаты обработки данных синхронных измерений пеленгов пеленгаторами PV и PG1 (вычисления пеленга по второму отсчету PG1)

Пороговый уровень, мВ	Число синхронных измерений n	n/528, %	Среднее значение разности пеленгов, град.	СКО, град.	Коэффициент корреляции
2,5	528	100	5	11,7	0,93
12,5	459	87	6	11,0	0,95
25,0	426	81	6	10,6	0,95
62,5	317	60	6	9,3	0,96
125,0	212	40	5	9,5	0,96
250,0	114	22	7	5,8	0,97

По данным первой выборки СКО уменьшается на $2,5^\circ$ при изменении порогового уровня в 100 раз. Во втором случае уменьшается на $5,9^\circ$ при тех же изменениях пороговых уровней. Большой разброс во втором случае (табл. 5) можно отнести к двум источникам:

- ошибкам, обусловленным поляризационными эффектами;
- ошибкам, обусловленным малым уровнем сигнала.

В работах (Uman, 1984, 1988) показано, что длительность первой полуволны широкополосного сигнала электрической и магнитной составляющих поля на расстояниях более 10—15 км не превышает 50—100 мкс.

На малых дистанциях, из-за увеличения влияния «статической» составляющей в уравнении для электрического поля дипольного излучателя, длительность первой полуволны электрической составляющей поля увеличивается до единиц миллисекунд.

Следовательно, измерения амплитуд магнитных компонент через 133 мкс от переднего фронта атмосферика проводятся при малых уровнях сигналов. В результате, как показали лабораторные исследования, расхождение в показаниях пеленгаторов PV и PG1 при измерении пеленга через 120—130 мкс могут достигать $3—4^\circ$, а через 250—260 мкс — $7—8^\circ$ в зависимости от длительности входного сигнала. С другой стороны, измерения проводятся через 133 мкс после начала излучения молнии, когда канал разряда в землю достигает высоты 2,5—3,0 км. На этих высотах наблюдается значительное ветвление канала молнии и, как следствие, изменение структуры излучаемого поля, приводящее к увеличению погрешности пеленгования молний. На это указывают авторы работы (Nerman et al., 1976). Они показали экспериментально, что измерения пеленга через 50—150 мкс после начала грозового разряда могут приводить к средним значениям погрешности до 35° и стандартному отклонению 60° на расстояниях до 7—12 км. Так как в нашем случае расстояния до грозовых разрядов, за некоторым исключением, превышали указанные выше, рассогласование в показаниях пеленгаторов PV и PG1 значительно меньше. Поскольку оба пеленгатора регистрируют все типы разрядов, но в несколько отличающемся временном окне

(в пеленгаторе PG1 время выборки сигналов составляет около 5 мкс, а в пеленгаторе PV — 100 нс), не исключено, что частично расхождение в их показаниях связано с поляризационными эффектами, характерными для разрядов в облаках. Другим не менее важным параметром, влияющим на погрешность измерений пеленга, может быть среднее значение или нулевой уровень шкалы АЦП.

В пеленгаторе PG1 применяются АЦП со смещенным нулем. Это требует при каждом измерении проводить осреднение измеренных значений амплитуд сигналов, определять ноль шкалы по некоторой выборке. В упомянутом пеленгаторе оцифровка аналоговых сигналов ведется по 50 квантующим импульсам. Возникает вопрос, какое оптимальное число точек отсчета необходимо для определения нуля шкалы, при котором погрешности измерений будут минимальными. В процессе обработки данных синхронной регистрации гроз проведены расчеты разности пеленгов и СКО для пеленгаторов PV и PG1 при различных пороговых уровнях (2,5, 12,5, 62,5 и 250 мВ) и различном числе отсчетов для определения средних значений (нуля шкалы) в пеленгаторе PG1. Рассматривались следующие варианты:

- 1 — осреднение по 5 точкам с 6-й по 10-ю;
- 2 — осреднение по 30 точкам с 11-й по 40-ю;
- 3 — осреднение по 10 точкам с 1-й по 10-ю;
- 4 — осреднение по 20 точкам с 1-й по 20-ю;
- 5 — осреднение по 40 точкам с 1-й по 40-ю.

В табл. 6 приведены результаты вычислений для перечисленных выше вариантов в порядке их рассмотрения.

Данные в табл. 6 не выявили зависимости разности между значениями СКО от выбранных выше вариантов определения средних значений или нуля шкалы. Минимальные расхождения характерны для 3-го варианта обработки, когда осреднение проводилось по 10 точкам, при пороговых уровнях более 60 мВ. Здесь очевидна взаимная связь между вычисляемым параметром и пороговым уровнем. Следовательно, основной причиной расхождений в показаниях пеленгаторов PV и PG1 является уровень шумов.

Таблица 6

**Зависимость СКО средних значений разности пеленгов
для пеленгаторов PV и PG1 при различных пороговых уровнях
и различном числе отсчетов**

Пороговый уровень, мВ	Число случаев n	СКО				
		Варианты осреднения				
		1	2	3	4	5
2,5	528	20,3	20,2	21,1	19,7	19,3
12,5	459	15,4	16,1	15,9	15,8	16,0
25,0	426	12,5	12,6	13,2	12,4	11,9
62,5	317	7,2	7,1	6,1	6,6	6,5
250,0	114	2,3	2,3	1,3	2,1	2,2

Аппаратно-программный комплекс (АПК) с высокой разрешающей способностью во времени положен в основу первой версии однопунктового грозопеленгатора-дальномера (ОГПД) «Алвес 0.1», разработанной в 1992—1993 гг. Краткое описание принципа работы ОГПД «Алвес 0.1» дано в работе (Огуряева и др., 2001). В дальнейшем технические возможности АПК были реализованы в ОГПД различных версий, а усовершенствованное программное обеспечение позволило совмещать функции измерительного комплекса и ОГПД.

Для пеленгации гроз в территориально разнесенных пунктах (пос. Воейково и г. Великий Новгород) в 1993 году были изготовлены два комплекта ОГПД «Алвес 0.1» и «Алвес 1.1». В их состав входили широкополосные пеленгаторы с рабочей полосой частот от 0,3 до 60 кГц. ОГПД различались чувствительностью приемников и интервалом записи данных. Первый был в 1,5 раза чувствительнее второго, и его интервал записи составлял 2800 мкс, в два раза больше, чем у второго. Частота квантования в обоих случаях составляла одну микросекунду. В качестве узкополосного пеленгатора использовался пеленгатор в составе ОГПД «Пеленг» с резонансной частотой 500 Гц. Интервал между квантуемыми импульсами составлял 128 мкс, а время выборки информации АЦП 5 мкс. Он рассчитан на работу совместно с дальномером в зоне до 50 км. Для синхронизации

измерений в территориально разнесенных пунктах до 2006 года использовались эталонные сигналы времени на частотах 4996 и 9996 кГц радиостанции РВМ. В последующий период синхронизация измерений проводилась по сигналам GPS. Перед началом эксперимента по синхронной регистрации в двух пунктах были проведены синхронные измерения пеленгаторами «Алвес 0.1», «Алвес 1.1» и «Пеленг» на территории центральной полевой экспериментальной базы Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейково в Ленинградской области (пос. Воейково).

Результаты измерений пеленгов тремя пеленгаторами в одном пункте записывались на жесткий диск. После завершения измерений с помощью специальных программ проводилась обработка исходных файлов. В табл. 7 приведены число случаев n , среднее квадратическое отклонение разности пеленгов σ_{Σ} и коэффициент корреляции r , вычисленные по данным синхронных измерений пеленгаторами «Алвес 0.1» и «Алвес 1.1» с 8 по 14 июля 1993 г. Данные в табл. 7 показывают, что СКО показаний широкополосных пеленгаторов (σ_{Σ}) изменяется от 2,4 до 3,9°.

Таблица 7

Результаты статистической обработки значений пеленгов синхронно измеренных ОГПД «Алвес 0.1» и «Алвес 1.1» в июле 1993 г.

Параметр	Дата						
	08.07	09.07	10.07	11.07	12.07	13.07	14.07
σ_{Σ} , град.	3,7	3,0	3,8	3,3	2,4	3,9	3,5
r	0,99	0,98	0,96	0,95	0,98	0,99	0,96
n	71	55	55	32	23	147	636

Подобные эксперименты были продолжены в грозовой сезон 1995 года, в течение которого сравнивались пеленги двух широкополосных пеленгаторов ОГПД «Алвес 1.1» с пеленгами узкополосного ОГПД «Пеленг». Как и в предыдущих экспериментах, данные трех пеленгаторов записывались на жесткий диск и затем обрабатывались (Огуряева и др., 2001).

В результате обработки формировались текстовые файлы, содержащие информацию об измеренных значениях амплитуды сигналов с электрической и двух магнитных антенн по каждому пеленгатору, вычисленные значения пеленгов, разности пеленгов, дальности, средних значений, СКО разности пеленгов σ_{Σ} и коэффициента корреляции. В табл. 8 приведены результаты обработки синхронных измерений пеленгов двумя широкополосными пеленгаторами за 15, 16 и 17 июня 1995 г. Значения σ_{Σ} сопоставимы с полученными в 1993 г. (см. табл. 8) и характеризуют ошибки, обусловленные неидентичностью аппаратной части пеленгаторов, временем измерения, длиной выборки и соотношением сигнал / шум. Сопоставление данных регистрации атмосфериков широкополосным и узкополосным пеленгаторами (табл. 9) подтверждает высказанные ранее соображения о влиянии пространственной ориентации молний на погрешность измерений азимута узкополосными пеленгаторами, особенно в ближней зоне. Приведенные ниже результаты обработки синхронных пеленгов узкополосного и широкополосного пеленгаторов показывают почти трехкратное увеличение σ_{Σ} до $8,4^{\circ}$. Наряду с влиянием относительно высокого уровня шумов, поляризация должна вносить существенные изменения в величину пеленгов, измеренных в различных точках волновых форм ЭМИ молниевых разрядов (атмосферика). Как отмечалось выше, если измерение амплитуд магнитных H_x и H_y составляющих ЭМИ молниевых разрядов, по которым вычисляется пеленг, проводится в первые 10 мкс на переднем фронте сигнала, то в этот момент длина канала разряда в землю достигает высоты нескольких сотен метров. Канал на таких высотах имеет значительную вертикальную составляющую. В этом случае поляризационная ошибка измерения пеленга, обусловленная влиянием пространственной ориентации молниевых разрядов, минимальна. По мере увеличения времени развития грозового разряда канал начинает ветвиться и, как известно, он может иметь значительную (до 5—9 км) горизонтальную протяженность (Степаненко, Гальперин, 1983; Гальперин, 2001). В ряде случаев у молний в землю горизонтальная часть достигает 20—25 и более километров (Proctor, 1983).

Следовательно, амплитуды сигналов, измеренные в других точках временных форм магнитных составляющих, должны быть искажены влиянием горизонтальных частей канала молнии.

Одним из способов улучшения соотношения сигнал / шум является увеличение быстродействия блока АЦП. Появляется возможность получения нескольких точек отсчета на переднем фронте сигнала и выборки той из них, где наблюдается приемлемое для определения пеленга соотношение сигнал / шум.

Таблица 8

Результаты обработки пеленгов, синхронно измеренных двумя широкополосными пеленгаторами

Дата	Число случаев n	Средняя разность пеленгов	СКО (σ_{Σ} , град)	Коэффициент корреляции r
15.06.1995	7150	5,3°	3,1°	0,99
16.06.1995	4906	6,3°	3,6°	0,99
17.06.1995	2262	4,2°	2,5°	0,98

Таблица 9

Результаты обработки пеленгов, синхронно измеренных широкополосными и узкополосным пеленгаторами

Дата	Число случаев n	Средняя разность пеленгов	СКО (σ_{Σ} , град)	Коэффициент корреляции r
15.06.1995	505	8,8°	8,4°	0,97
16.06.1995	1532	8,8°	7,6°	0,97
17.06.1995	1472	10,7°	7,7°	0,96

Ниже будут рассмотрены данные регистрации временных форм ЭМИ молниевых разрядов в полосе частот от 0,3 до 60 кГц. Они позволяют делать детальный анализ вариаций ЭМИ молниевых

разрядов и оценки возможных ошибок пеленгации грозовых разрядов (Снегуров, 2005; Снегуров, Снегуров, 2006).

Для регистрации волновых форм ЭМИ молний в указанном диапазоне частот был разработан аппаратно-программный комплекс, включающий следующие блоки и программы:

- блок аналоговой обработки сигналов, устанавливаемый в слот персонального компьютера;
- блок аналого-цифрового преобразователя, устанавливаемый в слот персонального компьютера, с встроенной памятью, портами ввода—вывода информации, в том числе текущего точного времени;
- пакет программ управления работой блоков аналоговой, аналого-цифровой обработки сигналов ЭМИ молний; программ формирования специальных файлов, необходимых для записи и хранения исходной информации и данных ее обработки, а также программ вывода информации на монитор и различные носители.

Комплекс обеспечивает непрерывную регистрацию электрической E_z и двух магнитных H_x и H_y составляющих ЭМИ. Интервал дискретизации, в зависимости от решаемой задачи, устанавливался от 1 до нескольких десятков микросекунд. Запись информации в память АЦП осуществляется синхронизирующим импульсом порогового устройства, связанного с передним фронтом электрической составляющей ЭМИ. Этим же импульсом выполняется команда записи в память АЦП текущего времени. Источником времени служили внутренние часы ПК или любой внешний источник сигналов точного времени. Для анализа формы сигналов и выделения переднего фронта первой полуволны ЭМИ молний используются встроенные в АЦП элементы памяти, где с момента прихода синхронизирующего импульса хранится информация о параметрах сигналов по трем измерительным каналам, включая данные за предшествующий синхроимпульсу интервал измерений. Далее оцифрованные данные по трем составляющим ЭМИ и точное время переписываются на жесткий диск. Таким образом, формируется файл с расширением *.alx, содержащий исходную цифровую информацию о временном распределении амплитуд сигналов ЭМИ молниевых разрядов. Параллельно формируется текстовый файл с расширением

*.lst в котором записывается дата, точное время и основные параметры (см. табл. 10), в частности значения относительных амплитуд E_z , H_x , H_y составляющих ЭМИ, пеленга («Пеленг») в градусах, расстояния («Дальность») в километрах и модуля отношения амплитуд электрической и магнитной составляющих E/H . В качестве приемной антенны использовалась антенна с широкополосными усилителями и фильтрами нижних частот для приема и обработки сигналов E_z , H_x и H_y составляющих излучения молниевых разрядов или сигналов имитатора, построенного по принципу колец Гельмгольца (Гальперин и др., 1971; Фрадин, Рыжков, 1962). Последние были изготовлены для тестирования антенн фазового грозопеленгатора-дальномера ФАГ-1 (Ардатов и др., 1991; Снегуров, Ардатов, 1985).

Для последующей обработки исходных данных в файлах с расширением *.alx разработана специальная программа-обработчик. В первых версиях 1993—2003 гг. она была выполнена под операционной системой MS DOS, а с 2004 г. под операционной системой Windows. Вид рабочего окна программы-обработчика и примеры обработки и представления данных показаны на рис. 1, 2 и в табл. 10.

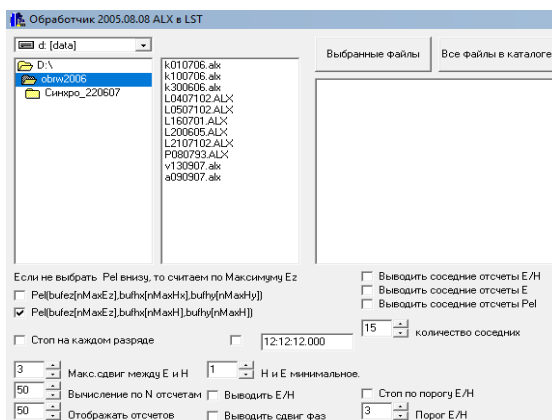


Рис. 1. Вид рабочего окна программы-обработчика.

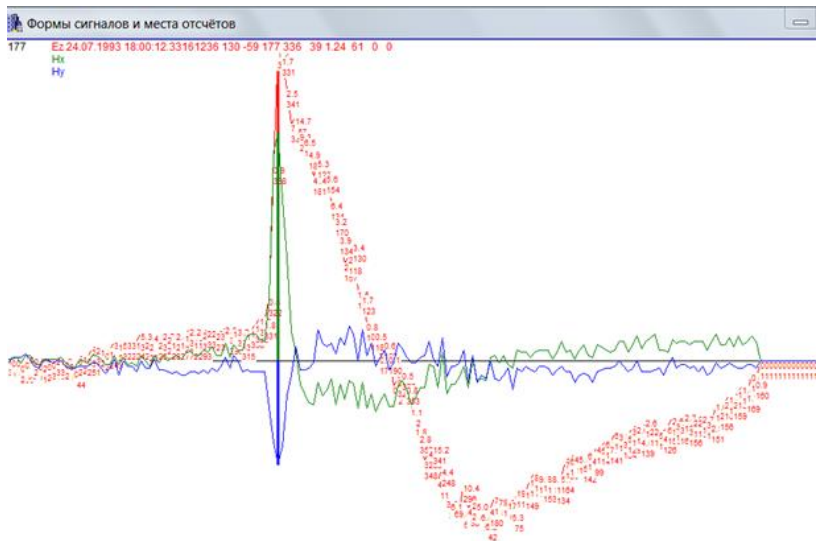


Рис. 2. Пример записи формы атмосферика (Ez , Hx и $Hу$ составляющих), зарегистрированного 24.07.1993 г. в 18:00:12.33161236.

Таблица 10

Пример записи данных в текстовый файл с расширением *.lst

Дата	чч:мм:сс.мс	Ez	Hx	$Hу$	Пеленг	Дальность
02.09.04	00:00:03.078	-38	31	-6	169	70
02.09.04	00:00:19.033	-58	31	-2	176	71
02.09.04	00:00:25.021	-49	37	-8	168	45
02.09.04	00:01:34.014	68	-41	1	179	75

Кроме общепринятых операций по поиску рабочих файлов в каталогах, программа позволяет обрабатывать файлы с расширением *.alx по заданным оператором параметрам. Она обеспечивает расчет пеленгов по трем алгоритмам. Первый алгоритм определяет пеленг по максимуму большей из Hx и $Hу$ амплитуд и синхронному отсчету по

второй составляющей (отметки в нижнем окне Pel [bufez...]). Второй алгоритм определяет пеленг по максимуму H_x и H_y амплитуд в заданном окне «Макс. сдвиг между E и H» (отметка в верхнем окне Pel [bufez...]). Третий алгоритм определяет пеленг по синхронным отсчетам H_x , H_y и E_z макс. В этом случае отметки отсутствуют в окнах Pel [bufez...]). В окне «Макс. сдвиг между E и H» можно установить любое значение от трех и более отсчетов. В окне «Вычисление по N отсчетам» устанавливается интервал обработки исходного сигнала в зависимости от его длительности, а в окне «Отображение отсчетов» устанавливается количество точек или длительность развертки на экране монитора.

Цифра в окне «N и E минимальное» указывает на выбранный порог амплитудного ограничения, при котором проводится обработка исходных данных. Отметки в окнах «Выводить E/H», «Выводить сдвиг фаз», «Выводить соседние отсчеты E/H», «Выводить соседние отсчеты Pel», «Стоп по порогу E/H» указывают на выполнение данной опции. Цифры в окнах «Количество соседних» и «Порог E/H» указывают на количество соседних отсчетов пеленгов и отношения E/H дополнительно к основным и порог E/H, при котором программа останавливается и выводит на экран монитора формы трех составляющих ЭМИ, которым соответствует заданный порог. Таким образом, можно проанализировать формы сигналов при различных значениях отношений E/H, получить распределения этих отношений и значений пеленгов по любому заданному числу точек в заданном временном окне. Возможны и другие версии программы-обработчика, которые позволяют проводить анализ волновых форм составляющих ЭМИ излучения молниевых разрядов, оценивать погрешности измерения пеленга, дальности, получать амплитудные и фазовые спектры исходных сигналов. Рассмотренная выше версия программы по умолчанию выводит в текстовый файл (см. табл. 11) дату (день, месяц, год), время (часы, минуты, секунды и микросекунды), амплитуды E_z , H_x , H_y , пеленг (град.), вычисленный по первому алгоритму, дальность (км).

Максимальный сдвиг между E_z и H_x , H_y составляющими сигналов равен трем отсчетам, вычисление (поиск максимальных

значений) Ez и Hx , $Hу$ проводится по N точкам при пороге, равном единице. Программа позволяет делать просмотр форм Ez и Hx , $Hу$ составляющих каждого сигнала. На рис. 2 приведен пример воспроизведения форм составляющих ЭМИ молний.

В верхнем левом углу рисунка приведены:

- дата и время регистрации (Ez 24.07.93 18:00:12.33161236);
- амплитуды Ez и Hx , $Hу$ составляющих (130, -59, 177);
- пеленг (336 градусов);
- расстояние (39 км);
- отношение E/H (1,24);
- технологическая информация (61, 0,0).

Пример вывода данных в текстовый файл программой-обработчиком в табл. 11 показывает, что в данном случае, кроме основных значений пеленга и отношения амплитуд E/H , получены дополнительно по пять значений указанных параметров. Распределение параметров во времени позволяет анализировать их изменения, делать оценки влияния тех или иных внешних факторов, в частности оценивать влияние шумов на измерения пеленга и дальности при реализации различных алгоритмов.

На первых этапах использования программы-обработчика был проведен анализ данных обработки файлов с расширением *.alx с целью оценки рассогласования измеренных значений пеленгов при использовании различных вариантов, рассмотренных выше, и выбора алгоритма для массовой обработки атмосфериков в грозопеленгаторах. На примере обработки 100706.alx — файла за 10.07.2006 г. покажем различие в полученных результатах. Исходный файл последовательно обрабатывался в соответствии с заданными алгоритмами. В результате сформированы три текстовых файла с расширением 100706.lst для каждого заданного алгоритма. Обработка файлов заключалась в разделении атмосфериков по знаку первой полуволны и определению средних значений поля Ez (отдельно для положительных и отрицательных первых полуволн атмосфериков).

Пример записи, обработки и вывода данных в текстовый файл

Дата	чч:мм:сс.мс	Ez	Hx	$Hу$	Π	Δ	E/H	$E/H2$	$E/H3$	$E/H4$	$E/H5$	$E/H6$	$\Pi2$	$\Pi3$	$\Pi4$	$\Pi5$	$\Pi6$
24.07.1993	00:00:18.074	-49	-23	0	0	142	2,1	1,6	1,7	1,7	1,3	2,1	11	4	355	359	8
24.07.1993	00:00:48.647	-74	-33	-17	27	94	1,9	0,9	0,0	1,5	1,6	1,9	63	44	14	21	27
24.07.1993	00:02:06.170	96	58	3	3	72	1,6	0,5	0,5	0,3	1,3	1,6	180	180	180	16	359
24.07.1993	00:02:20.569	-53	-28	-5	10	132	1,9	1,0	0,0	1,4	0,7	1,6	359	180	44	15	10

По каждому атмосферерику выборка составляла пять отсчетов амплитуды поля Ez до максимального значения Ez_{max} (шестой отсчет) и 15 отсчетов за максимумом поля и соответствующие им значения пеленга, разности пеленгов между текущим значением и пеленгом, соответствующим максимуму амплитуды поля Ez_{max} .

Отдельно для положительных и отрицательных первых полувольт атмосферерикув из соответствующей выборки вычислялись средние, СКО электрического поля Ez , соответствующие им средние значения пеленга и СКО пеленга при надежности 0,95. В общей сложности было обработано 145147 записей атмосферерикув с использованием трех алгоритмов. Результаты расчетов для средних значений Ez и пеленга для трех алгоритмов (P1, P2 и P3), для средних Ez и разности пеленгов P1 – P(Ez_{max}), P2 – P(Ez_{max}) и P3 – P(Ez_{max}) для положительных полувольт атмосферерикув приводятся на рис. 3—5.

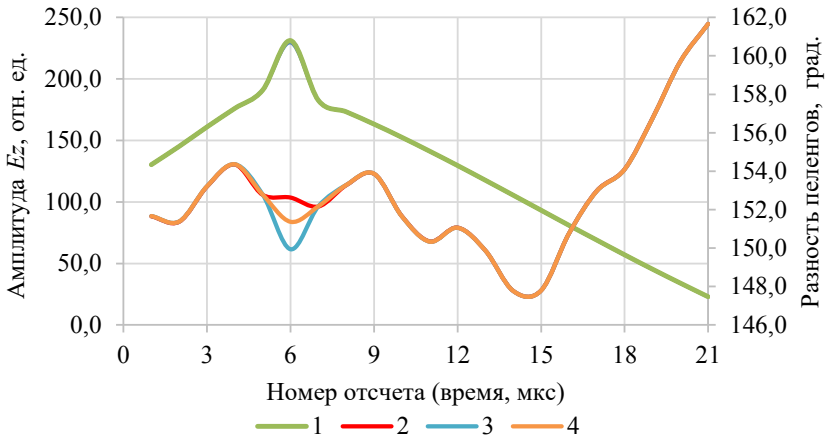


Рис. 3. Зависимость амплитуды поля Ez и разности пеленгов, полученных с помощью трех алгоритмов обработки атмосферерикув с положительной полувольтной, от времени: 1 — $Ez_1 \approx Ez_2 \approx Ez_3$; 2 — алгоритм P1; 3 — алгоритм P2; 4 — алгоритм P3.

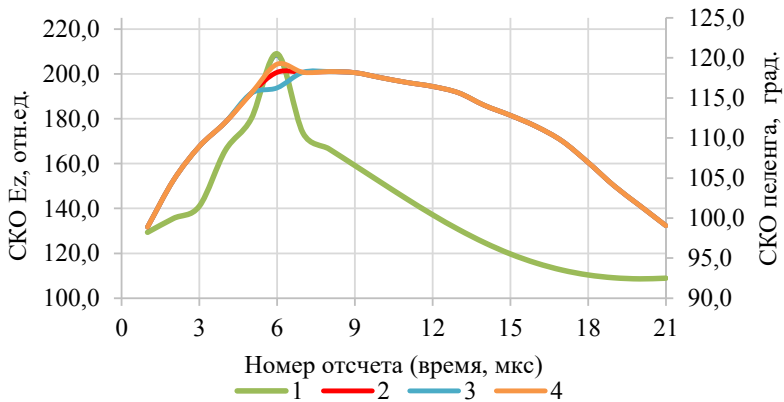


Рис. 4. Зависимость СКО амплитуды поля Ez и пленгов, полученных с помощью трех алгоритмов обработки атмосфериков с положительной полуволной, от времени: 1 — СКО P1cp. \approx СКО P2cp. \approx СКО P3cp.; 2 — СКО $Ez1$; 3 — СКО $Ez2$; 4 — СКО $Ez3$.

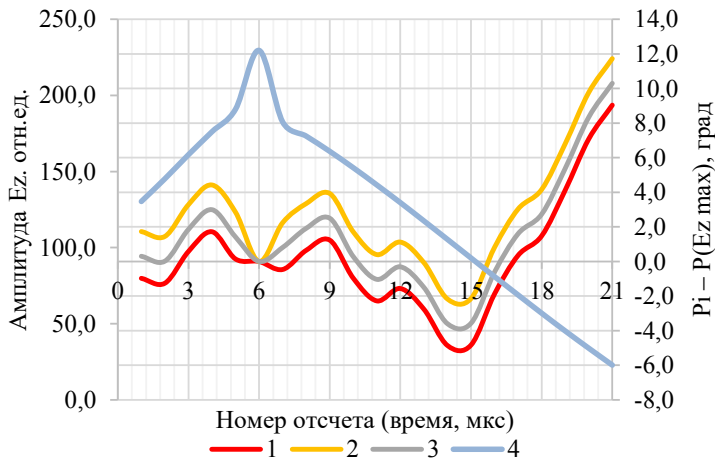


Рис. 5. Зависимость средних значений амплитуды поля Ez и разности пленгов ($P_i - P(Ez \max)$), полученных с помощью трех алгоритмов обработки атмосфериков с положительной полуволной, от времени: 1 — Ez ; 2 — $P1 - P(Ez \max)$; 3 — $P2 - P(Ez \max)$; 4 — $P3 - P(Ez \max)$.

Средние значения Ez , пеленгов и их СКО хорошо совпадают между собой (с точностью до знака после запятой) практически в 20 точках измерений, как показано на рис. 3—5. Исключение составляет точка, соответствующая максимуму поля Ez max. Как показано в табл. 12, средние значения пеленга и СКО изменяются на 3 градуса в зависимости от алгоритма обработки форм атмосфериков. Если обратиться к рассмотрению изменения средних значений разности пеленгов и амплитуды поля Ez (рис. 5), то следует отметить, что при больших амплитудах сигналов разности пеленгов изменяются в пределах одного градуса. Как правило, это происходит на переднем фронте атмосферика в районе максимума амплитуды поля. По мере уменьшения сигнала Ez разность пеленгов возрастает. Это указывает на то, что усиливается влияние шумов (Снегуров, 2005; Снегуров, Снегуров, 2010).

Таблица 12

Результаты обработки атмосфериков по трем алгоритмам

Параметр	Алгоритмы обработки					
	1	2	3	1	2	3
	<i>Атмосферик положительной полярности</i>			<i>Атмосферик отрицательной полярности</i>		
Ez max ср., отн. ед.	230	231	231	-198	-199	-199
СКО Ez max, отн. ед.	208	209	209	-161	-162	-162
Пеленг ср., град.	153	150	151	110	111	110
СКО пеленга, град.	118	116	119	100	98	101

Этот эксперимент показывает, что три алгоритма обработки форм атмосфериков дают близкие результаты. Различие наблюдается в районе максимума поля, где средние значения и СКО пеленгов отличаются на 1—3 градуса.

Минимальные значения разности пеленгов ($P1 - P(Ez \max)$) характерны для случая, когда используется первый алгоритм обработки данных. Минимум наблюдается на переднем фронте атмосферика вблизи от максимальных амплитуд поля. С точки зрения реализации аппаратной части грозопеленгатора целесообразно воспользоваться первым алгоритмом измерения пеленга, в котором пеленг определяется по максимуму Hx или $Hу$ амплитуд в заданном временном «окне», которое не должно превышать половины полупериода.

По данным (MacGorman, Rust, 1988) систематическая погрешность, обусловленная влиянием местных предметов («погрешность пункта» φ_{se}) и неточностью установки антенн пеленгатора достигает 5° . Для пеленгаторов системы LLP, установленных на территории Финляндии (Tuomi, 1991) со свойственными им условиями размещения (наличие антенн, деревьев, зданий, сооружений и т. д.), «погрешность пункта» φ_{se} носит синусоидальный характер с максимальной амплитудой до 10° . Причиной появления «погрешности пункта» φ_{se} может служить наличие вблизи антенн пеленгаторов линий электропередачи, связи, объектов, способных переизлучать электромагнитные волны, в частности, высокие здания, мачты, антенны (Uman, 1988). Как правило, исключить φ_{se} путем оптимального размещения антенн пеленгаторов не удастся. Единственный способ — корректировка измеренных значений пеленгов с помощью поправочных коэффициентов, полученных экспериментально для каждого пункта. Способы их определения изложены в работах американских и финских специалистов (MacGorman, Rust, 1988; Tuomi, 1991). Они сводятся к синхронным измерениям пеленгов в трех и более пунктах регистрации. Возможно применение простого способа — сравнение показаний пеленгаторов в двух территориально разнесенных пунктах. Единственным условием является отсутствие гроз в зоне до 100—200 км, когда расстояние между пунктами значительно меньше расстояния до ближайшего грозового очага.

Рассмотрим результаты оценки φ_{se} для широкополосных пеленгаторов с различными условиями размещения, полученные авторами при проведении экспериментов по оценке точностных характеристик ОГПД. В эксперименте использовались данные синхронных измерений координат грозовых разрядов и параметров их ЭМИ однопунктовыми широкополосными грозопеленгаторами в составе ОГПД версий «Alwes 7.04.2» и ГДА-1 и многопунктовой грозопеленгационной системой (ГПС) версии «Алвес 9.07», подробное описание которой дано в работах (Снегуров, Снегуров, 2010, 2017). ОГПД построены на базе микроконтроллеров. Для синхронизации измерений используются встроенные в них GPS/Глонасс-приемники, обеспечивающие погрешность менее одной микросекунды. В течение нескольких грозовых сезонов данные наблюдений с ОГПД через Интернет передавались на центральный сервер ГПС и записывались в базу данных. По соответствующим запросам на сервере были сформированы файлы с данными синхронно зарегистрированных атмосфериков ОГПД и ГПС. Максимальный интервал синхронизации не превышал 5000 мкс. Таким образом, можно было получить информацию за различные интервалы синхронизации от 1 до 5000 мкс. В периоды высокой грозовой активности, особенно во время прохождения близких грозовых очагов, возможны случаи регистрации ОГПД и ГПС различных атмосфериков в одном временном окне. При регистрации удаленных атмосфериков наблюдаются случаи, когда аппаратура фиксирует характерную точку рабочего сигнала (например, максимум электрического поля) не на первой полуволне атмосферика. В таких ситуациях появляются грубые промахи, которые можно исключить сужением временного окна синхронизации измерений или при камеральной обработке использовать критерии оценки вероятности грубого промаха. В настоящей работе использовался критерий Граббса—Смирнова (ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002), основанный на последовательном исключении из рядов промахов, определяемых по основным статистическим параметрам (среднее и дисперсия), и соответствующих значений критерия для определенной длины выборки.

На примере данных синхронных измерений в грозовой период 2017 г. оценим влияние интервала синхронизации на повторяемость грубых промахов, рассмотрим характер изменения «ошибки пункта» φ_{se} и ее величину, сравним пеленги, измеренные ОГПД и ГПС на различных расстояниях. За период наблюдений в общем было синхронно зарегистрировано во временном интервале от 1 до 5000 мкс однопунктовым ОГПД и многопунктовой ГПС 52486 разрядов. Для каждого разряда с помощью двух систем определены время регистрации, пеленги, расстояния и ряд параметров ЭМИ, в частности, амплитуда сигнала электрической и магнитных (для ОГПД) составляющих поля, длительность переднего фронта, поляриность и длительность первой полуволны.

На первом этапе обработки данных сделана оценка потерь, обусловленных аппаратурными ошибками регистрации атмосфериков, случаями наложения во времени волновых форм друг на друга, ошибками определения знака полуволны. Из файла с исходными данными были сформированы два дополнительных текстовых файла, содержащих атмосферерики, засинхронизированные в интервалах от 1 до 1000 и от 1 до 100 мкс. До обработки каждый из трех файлов содержал данные 52486 (интервал синхронизации 5000 мкс), 16102 (интервал синхронизации 1000 мкс) и 2121 (интервал синхронизации 100 мкс) атмосфериков. В результате обработки потери исходных файлов составили 6434 (12,3 %), 536 (3,3 %) и 147 (6,9 %) соответственно (см. табл. 13). При интервале синхронизации более 1000 мкс потери возрастают.

На втором этапе обработки данных вычислены средние значения разностей пеленгов ($R_{ГПС} - R_{ОГПД}$) в зависимости от направления и расстояния, измеренных ГПС (рис. 6, 8 и 9). Таким образом, получены значения «ошибки пункта» φ_{se} для интервалов синхронизации 100 и 1000 мкс по ОГПД и ОГПД № 2 (рис. 6). Величина φ_{se} зависит от азимута, и ее абсолютная амплитуда достигает 22—23 градусов. Амплитуда φ_{se} для интервала синхронизации 1000 мкс на 5—7 градусов меньше. Это различие наблюдается по азимутам 270—360 градусов. Расхождение в форме

кривых в этом диапазоне азимутов, видимо, связано со сравнительно малым числом случаев.

Таблица 13

**Результаты статистической обработки данных
синхронных измерений ОГПД и ГПС**

Интервал синхронизации, мкс	Количество атмосфериков				$(P_{ГПС} - P_{ОГПД})_{ср.}$, град.	СКО, град.
	Исходное	Грубые промахи		После отбраковки		
		ед.	%			
5000	52486	6434	12,3	46052	14,2	15,3
1000	16102	536	3,3	15566	18,2	18,8
100	2121	147	6,9	1974	17,7	18,7

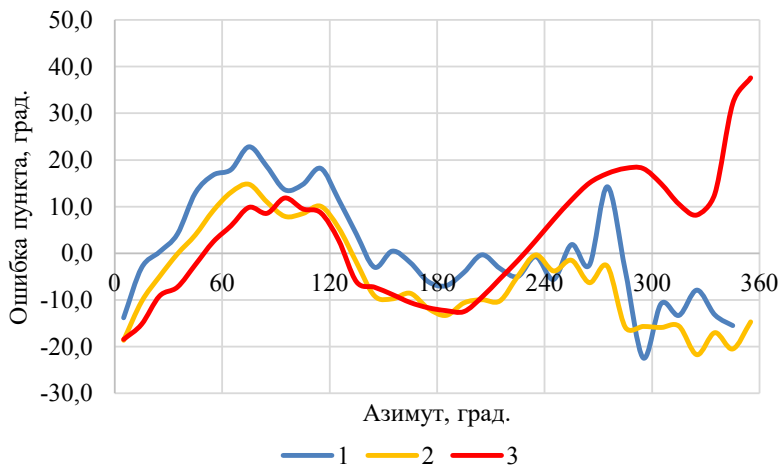


Рис. 6. Зависимость величины «Ошибки пункта» φ_{se} от азимута для ОГПД (1 и 2) и ОГПД № 2 (3) для интервалов синхронизации: 1 — 100 мкс; 2 — 1000 мкс; 3 — 5000 мкс.

Если сравнить величину φ_{se} ОГПД с аналогичной для ОГПД № 2, установленного в других физико-географических условиях, и соответственно других влияющих на антенну пеленгатора зданий и сооружений, то можно заметить значительное расхождение значений φ_{se} для первого и второго ОГПД во второй половине шкалы пеленгатора. Обработка данных ОГПД № 2 и ГПС (табл. 14) показала, что, в отличие от первого комплекта, наблюдается слабый рост разности ($P_{ГПС} - P_{ОГПД}$) средних значений для интервала синхронизации 2000 мкс и рост СКО в интервале 100 мкс и далее до 5000 мкс. В общей сложности обработано около 62 тысяч атмосфериков. Таким образом, максимальная «ошибка пункта» φ_{se} может достигать 37 и более градусов. Практически идеальных условий установки грозопеленгаторов не существует. По этой причине всегда существует φ_{se} , которую надо определять для каждого грозопеленгатора, установленного на пункте. После проведения тестирования и определения систематической погрешности в программу обработки ОГПД необходимо вводить поправочные коэффициенты для корректировки показаний приборов. Это особенно важно при использовании грозопеленгаторов в многопунктовых системах местоопределения гроз, где погрешности измерения пеленга не должны превышать 1—2 градуса.

Таблица 14

**Зависимость средних значений и СКО
от интервала синхронизации данных ОГПД № 2 и ГПС**

Интервал синхронизации, мкс	100	500	1000	2000	3000	4000	5000
($P_{ГПС} - P_{ОГПД}$) ср., град.	-2,24	-0,33	-0,05	0,07	-0,07	-0,24	-0,21
СКО ($P_{ГПС} - P_{ОГПД}$), град.	12,24	13,05	13,29	13,59	13,91	14,70	15,21
Число случаев	3379	10966	19847	34704	46209	56183	62871

Определенный интерес представляют результаты сравнения данных грозопеленгаторов и ГПС с привязкой к расстоянию (рис. 7—9). При продолжении исследований синхронной работы ОГПД и ГПС были определены два параметра, характеризующие зону обнаружения грозовых разрядов ОГПД и вариации разности пеленгов ($P_{ГПС} - P_{ОГПД}$) при различных временных интервалах синхронизации наблюдений.

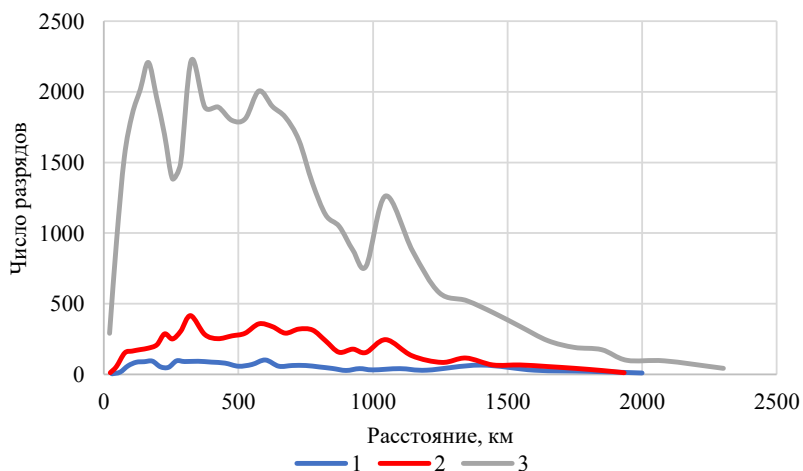


Рис. 7. Зависимость числа грозовых разрядов, зарегистрированных ОГПД и ГПС, от расстояния для различных интервалов синхронизации: 1 — 100 мкс; 2 — 1000 мкс; 3 — 5000 мкс.

На рис. 7 даны распределения числа атмосфериков, зарегистрированных совместно ОГПД и ГПС, в интервалах синхронизации 100, 500 и 5000 мкс в зависимости от расстояния. Графики показывают, что максимум числа разрядов приходится на расстояния от 200 до 600 км, независимо от интервала синхронизации. На меньших расстояниях наблюдается резкий спад активности, обусловленный малым числом близких гроз. На расстояниях более 600 км спад обусловлен пороговым уровнем, с которого срабатывает

устройство. Вероятность обнаружения грозových разрядов уменьшается вследствие естественного распределения амплитуд поля в источнике (молниевом разряде).

Графики на рис. 7 показывают, что радиус обнаружения гроз превышает 2000 км при интервале синхронизации 5000 мкс и несколько ниже (около 2000 км) при интервалах 500 и 100 мкс.

Разность пеленгов по данным ОГПД и ГПС на удалениях от 100 до 2000 км значительно осциллирует с ростом средних значений, независимо от интервала синхронизации (рис. 8). Такое поведение кривых разности пеленгов ($P_{\text{ГПС}} - P_{\text{ОГПД}}$) может зависеть как от вариаций пеленгов ОГПД и ГПС вследствие воздействия отраженных от ионосферы сигналов на земную волну, так и от неоднородности подстилающей поверхности. На расстояниях менее 100 км практически исключается воздействие ионосферы.

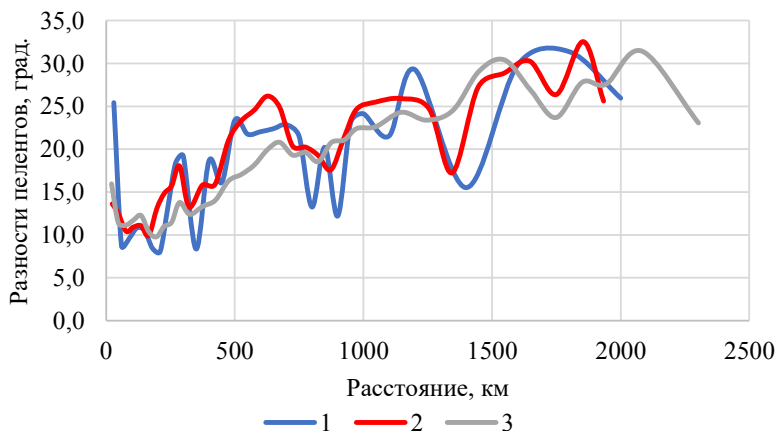


Рис. 8. Зависимость разности пеленгов, зарегистрированных ОГПД и ГПС, от расстояния для различных интервалов синхронизации в зоне до 2000 км: 1 — 100 мкс; 2 — 1000 мкс; 3 — 5000 мкс.

Рост разности пеленгов нельзя объяснить неточностями работы ГПС и целиком можно отнести к поляризационным эффектам, связанным с пространственной ориентацией каналов молний (рис. 9).

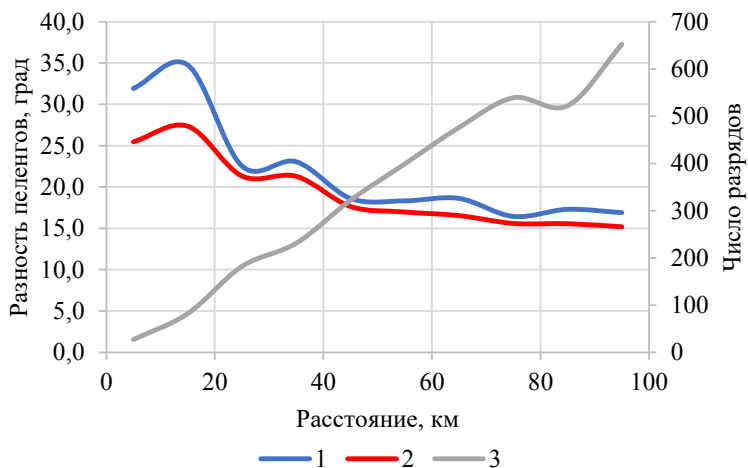


Рис. 9. Зависимость разности пеленгов (1), СКО (2) и числа разрядов (3), зарегистрированных синхронно ОГПД и ГПС, от расстояния в зоне до 100 км.

Заключение

Серия синхронных измерений пеленгов широкополосными и узкополосным грозопеленгаторами с различным аппаратным и программным обеспечением в лабораторных условиях показала значительную зависимость средних значений разности пеленгов и стандартного отклонения от времени их измерения. Стандартное отклонение разности пеленгов пар пеленгаторов с различным аппаратным обеспечением может отличаться в 6—10 раз. Это объясняется изменением соотношения сигнал/шум на различных участках имитируемых аналоговых сигналов.

Экспериментально определена зависимость $\sigma_{\text{ш}}$ измерения пеленга от соотношения сигнал / шум. При соотношении сигнал / шум более 7 ошибка $\sigma_{\text{ш}}$ для широкополосного пеленгатора не превышает 2° , а более 25 — $\sigma_{\text{ш}} < 1^\circ$. Это соотношение сигнал / шум в 4 раза меньше расчетного.

Полевые исследования разности пеленгов, измеренных широкополосными пеленгаторами в составе однопунктовых грозопеленгаторов-дальномеров и многопунктовой грозопеленгационной системой, показали, что минимальные значения разности пеленгов характерны для случаев измерения пеленга при максимальных значениях электрического поля на переднем фронте первой полуволны.

Величина «ошибки пункта» пеленгаторов колеблется в зависимости от места установки от 22—23 до 37 градусов.

В зоне от 100 до 2000 км разности пеленгов носят осциллирующий характер и увеличиваются в среднем от 10 до 32 градусов. Эти изменения, видимо, связаны с влиянием ионосферы и подстилающей поверхности Земли.

В зоне менее 100 км рост разности пеленгов по мере уменьшения расстояния от 15 до 35 градусов целиком можно отнести к поляризационным эффектам, связанным с пространственной ориентацией каналов молний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ардатов И. В., Снегуров В. С., Эйхгорн В. Г. (1991). Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации. — Л.: Гидрометеиздат. С. 288—313.

Астащенко А. И., Махоткин Л. Г. (1963). О пеленговании ближних грозовых разрядов // Труды ГГО. Вып. 146. С. 10—16.

Бару Н. В., Кононов И. И., Соломоник М. Е. (1976). Радиопеленгаторы-дальномеры ближних гроз. — Л.: Гидрометеиздат. 143 с.

Гальперин С. М. (1965). Использование рамочных антенн с ферритовыми сердечниками для приема СДВ излучения // Информационный сборник НИО ЛВИКА им. А. Ф. Можайского. № 76. С. 10—13.

Гальперин С. М. (1966). Устройство формирования сигналов, образующих однозначный пеленг на грозовые разряды в двухканальных пеленгаторах // Информационный сборник НИО ЛВИКА им. А. Ф. Можайского. № 83. С. 41—44.

Гальперин С. М. (2001). К вопросу о совместном использовании грозопеленгаторов-дальномеров и РЛС метеорологического назначения // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Вып. 3 (549). С.147—153.

Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Соломоник М. Е. (1967). Сверхдлинноволновый автоматический радиопеленгатор гроз для сопряжения с РЛС метеорологического назначения и телеметрическим каналом. — А.С. № 200633. Бюл. № 17.

Гальперин С. М., Пащенко Е. Г., Соломоник М. Е. (1971). Устройство для контроля инструментальных ошибок пеленгаторов. — А.С. № 311229. Бюл. 24.

Гальперин С. М., Кононов И. И., Кунин В. И., Николаев В. И., Петренко И. А., Плотников В. Д., Рыбаков К. И., Снегуров В. С., Стасенко В. Н. (1988). Грозопеленгатор-дальномер «Очаг2П». — Л.: Гидрометеиздат. 60 с.

ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 (2002). Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений.

Кашировский В. Е. (1966). Определение местоположения гроз радиотехническими методами. — М.: Наука. 248 с.

Кононов И. И., Петренко И. А., Снегуров В. С. (1986). Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. — Л.: Гидрометеиздат. 222 с.

Махоткин Л. Г. (1997). Столетие грозоотметчика А. С. Попова // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Вып. 1 (546). С. 73—79.

Махоткин Л. Г., Иньков Б. К. (1980). Проверка показаний пеленгаторов атмосфериков на очень малых расстояниях // Труды ГГО. Вып. 401. С. 57—61.

Огуряева Л. В., Снегуров А. В. и др. (2001). Грозопеленгатор-дальномер для систем метеобеспечения // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Вып. 3 (549). С. 190—199.

Снегуров А. В. (2005). Экспериментальные исследования погрешностей пеленгации грозовых очагов / Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Специальность 25.00.30 — метеорология, климатология, агрометеорология. — СПб: ГГО. 149 с.

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2006). К методике исследования временных форм близких атмосфериков // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). Вып. 7 (555). С. 149—157.

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2010). Экспериментальные исследования влияния шумов на погрешности пеленгации грозовых разрядов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Физика атмосферы. Спецвыпуск. С. 87—92.

Снегуров А. В., Снегуров В. С. (2017). Система местоопределения гроз // Труды ГГО. Вып. 586. С. 117—140.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., Эйхгорн В. Г. (1990). ПОГОДА — прибор отображения грозовой обстановки, действующий автоматически / В сб.: Труды IV Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. — Нальчик. С. 308.

Снегуров В. С. (1985). Устройство для определения дальности догроздовых разрядов. — А. С. № 1190322. Бюл. № 41.

Снегуров В. С. (1988). Способ измерения фазы сигналов. — А. С. СССР. № 1366968. Бюл. № 2.

Снегуров В. С., Ардатов И. В. (1985). Фазовый анализатор грозоопасности. — А.С. № 1190321. Бюл. № 41.

Снегуров В. С., Ардатов И. В. (1986). Фазовый анализатор местоположения гроз — А. С. № 1223175. Бюл. № 13.

Снегуров В. С., Семагин Б. В. (1980). Результаты исследования фазовых соотношений между электрической и магнитной компонентами поля молниевых разрядов // Труды ГГО. Вып. 401. С. 66—70.

Степаненко В. Д., Гальперин С. М. (1983). Радиотехнические методы исследования гроз. — Л.: Гидрометеиздат. 204 с.

Фрадин А. З., Рыжков Е. В. (1962). Измерения параметров антенн. — М.: Связьиздат. 352 с.

Frisius J., Madlow M., Pelz J. (1984). Modellrechnungen zur physikalischen interpretation der Atmosphärischen-Beobachtungen mit dem Short-Range Lightning Activity Counter und Direction Finder (SRLCDF) zum Zweck der Gewitterortung // Meteorologische Abhandlungen. Bd. 1. H. 4. 95 s.

Herman B. D., Uman M. A., Brantley R. D., Krider E. P. (1976). Test of the principle of a wideband magnetic direction finder for lightning return strokes // J. Appl. Meteor. V. 15. № 4. P. 402—404.

Krider E. P., Noggle R. C., Uman M. A. (1976). A gated, wide-band magnetic direction finder for lightning return strokes // J. Appl. Meteorol. V. 15. № 3. P. 301—306.

MacGorman D. R., Rust W. D. (1988). An evaluation of two lightning ground strike locating systems // Final report to the Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research. — Rockville. MD. 76 p.

Muller-Hillebrand D. (1962). Magnetic field of the lightning discharge / Proc. Int. Conf. Gas. Discharges and Electr. — London: Supply Industry. P. 89—110.

Proctor D. E. (1983). Lightning and precipitation in a small multicellular thunderstorm // J. Geoph. Res. V. 88. NC9. P. 5421—5440.

Snegurov A. V. (1992). One station range and direction finding / Proc. 9th Int. Conf. on Atm. Electricity. V. 1. SPb. P. 287—291.

Stoffregen W. (1947). Distant localization of individual atmospheric with a cathode-ray direction-finder of unidirectional type // *Arkiv für matematik, astronomy och fysik*. Bd. 34A. № 26. S. 1—14.

Tuomi T. J. (1991). On the Accuracy and Detection Efficiency of Lightning Location System of Direction Finders. FMI, P.O.BOX 503, SF-00101 Helsinki, Finland. P. 1—16.

Uman M. et al. (1980). Errors in magnetic direction finding due to non-vertical lightning channels // *Radio Sci.* V. 15. № 1. P. 35—39.

Uman M. (1984). *Lightning*. — New York: Dover Publications. 298 p.

Uman M. (1988). Direction Finder (DF) Site Selection Criteria. LLP Budgetary Proposal BP125-88. Rev. 9/88.

Watson-Watt R. A., Herd J. P. (1926). An instantaneous direct-reading radiogoniometer // *JIEE*. V. 64 (353). P. 611—622.

ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОЯЧЕЙКОВЫХ ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Ж. Ю. Аннаева

Высокогорный геофизический институт
360030 КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2
E-mail: conkordya@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2018
Поступила после доработки 20.12.2018

Введение

На территории Северного Кавказа одноячейковые процессы наблюдаются в 10—15 % случаев образования всех градовых процессов. Это связано со специфическими условиями их образования, не характерными для других типов градовых процессов.

Одноячейковые градовые облака развиваются в дни со слабым ветром и с малыми вертикальными его сдвигами в малоградиентных полях пониженного и повышенного давления. Как правило, они осесимметричны и малоподвижны или перемещаются, подчиняясь орографии. Одноячейковые градовые процессы возникают беспорядочно за счет внутримассового развития и сопровождаются выпадением слабого града в виде отдельных пятен (Абшаев, 1984; Федченко и др., 1991; Margwitz, 1972; Руководство..., 1987).

Цель работы — построение физико-статистической модели одноячейковых градовых облаков с учетом распределения основных радиолокационных параметров облаков, наблюдавшихся на территории Северного Кавказа в летние периоды 2011—2016 годов.

Полученные закономерности могут быть использованы в оперативной работе по засеву градовых облаков, при разработке

методов сверхсрочного прогноза градовой активности, а также при сопоставительном анализе результатов численного моделирования градовых облаков с данными экспериментальных исследований.

Методика исследований

Для построения физико-статистической модели одноячейковых градовых облаков были обработаны данные радиолокационных наблюдений за 6 лет. По результатам радиолокационных исследований грозо-градовых процессов, наблюдавшихся на территории Северного Кавказа в летние сезоны 2011—2016 годов с использованием «АСУ-МРЛ», выделены 64 конвективные ячейки (КЯ) в радиусе 100 км обзора локатора и получены распределения:

- скоростей и направлений перемещения одноячейковых градовых облаков;
- расстояний перемещения КЯ;
- времени жизни градовых ячеек;
- времени достижения КЯ градового состояния;
- высоты верхней границы одноячейковых градовых облаков в период максимального развития;
- площади выпадения града.

Полученная информация занесена в таблицы соответствующей базы данных (Инюхин, 2014).

Результаты исследований

Анализ обширного экспериментального материала, полученного при выполнении радиолокационных наблюдений, позволил выявить некоторые глобальные характеристики движения и развития одноячейковых градовых процессов в регионе.

На рис. 1 представлено распределение направлений перемещения одноячейковых градовых облаков, из которого следует, что распределение направлений перемещения градовых ячеек практически равновероятностное, что характерно для одноячейковых

процессов. Максимум приходится на юго-западное направление со средним значением 185 градусов и стандартным отклонением 94,7.

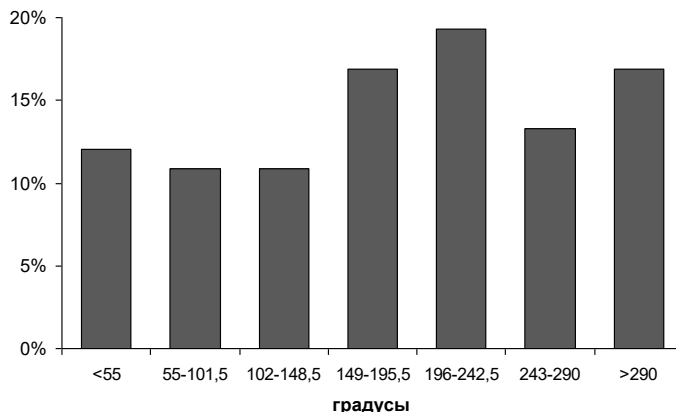


Рис. 1. Гистограмма повторяемости направлений перемещения одноячейковых градовых облаков.

Анализ данных рис. 2 показал, что распределение расстояний перемещения одноячейковых градовых облаков может быть описано одномодальным законом. За время своего существования конвективные ячейки в 86 % случаев проходят расстояние менее 15,5 км, а в 95 % случаев — не более 20 км. При этом среднее пройденное расстояние составляет 9,8 км со стандартным отклонением 6,7 км, минимальное — 2,3 км, а максимум приходится на значение 36,2 км.

Повторяемость скоростей перемещения одноячейковых градовых облаков также может быть описана одномодальным законом распределения (см. рис. 3). Среднее значение скорости составляет 12,1 км/ч при стандартном отклонении 6,5 км/ч, а минимальная и максимальная скорости перемещения одноячейковых градовых облаков равны 2,1 и 34,5 км/ч соответственно. В 84 % случаях скорость перемещения ячеек не превышает 18 км/ч.

Среднее время жизни (рис. 4) для рассмотренных градовых ячеек

составило 45 мин при стандартном отклонении 12 мин. При этом минимальное время жизни равно 20 мин, максимальное — 69 мин.

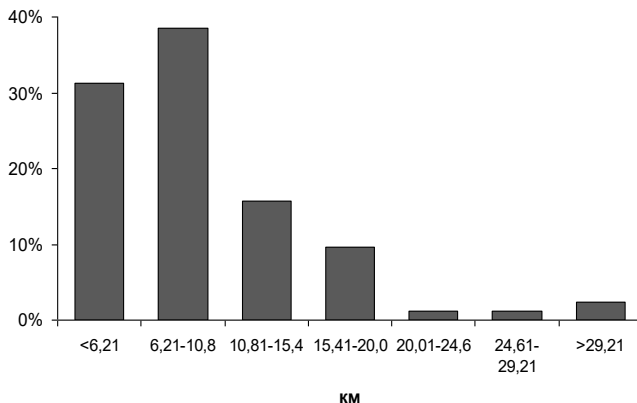


Рис. 2. Гистограмма повторяемости расстояний перемещения однопячейковых градовых облаков.

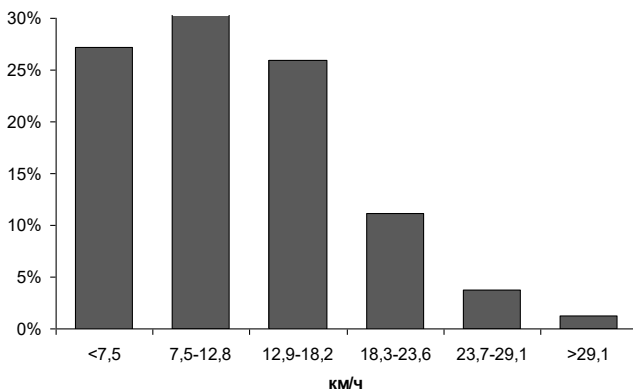


Рис. 3. Гистограмма повторяемости скорости перемещения однопячейковых градовых облаков.

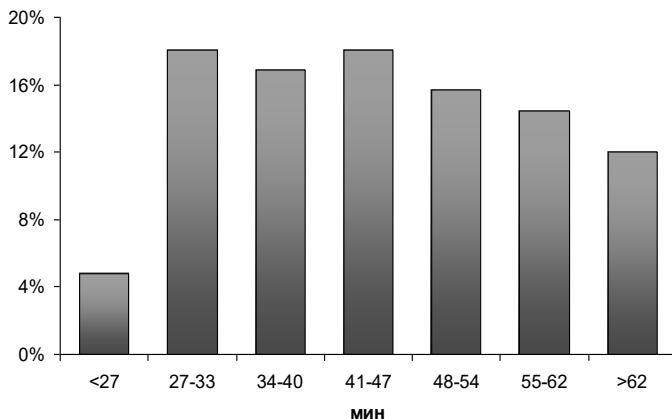


Рис. 4. Гистограмма повторяемости времени жизни одноклеточных градовых облаков.

Наряду с динамическими характеристиками перемещения градовых ячеек большой интерес представляют энергетические параметры развития градовых облаков. Ниже представлены гистограммы повторяемости некоторых из этих параметров, полученных в момент максимального развития конвективных ячеек за летний период 2011—2016 гг.

Как видно из рис. 5, минимальное значение времени достижения ячейками градового состояния составило 7 мин, максимальное — 39 мин. Среднее время достижения ячейками градового состояния — 17 мин при стандартном отклонении 7 мин.

Верхняя граница градовых ячеек в период их максимального развития в 83 % случаев расположена на высотах 7—11,4 км, а конвективные ячейки с высотой верхней границы больше 10 км составляют 54 % (рис. 5). Минимальная высота верхней границы градовой ячейки составила 4,8 км, максимальная — 12,8 км. Среднее значение высоты верхней границы для рассмотренных градовых ячеек составило 9,1 км при стандартном отклонении 1,7.

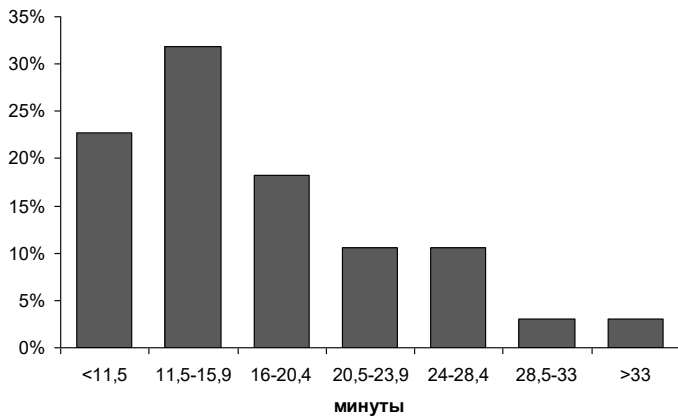


Рис. 5. Гистограмма повторяемости времени достижения ячейкой градового состояния.

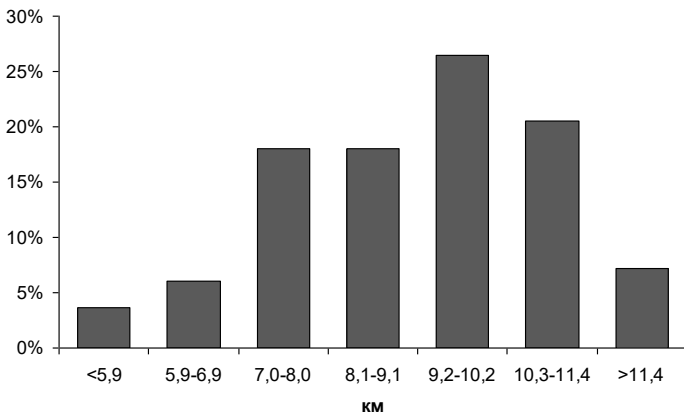


Рис. 6. Гистограмма повторяемости высоты верхней границы однокучевых градовых облаков (в момент максимального развития).

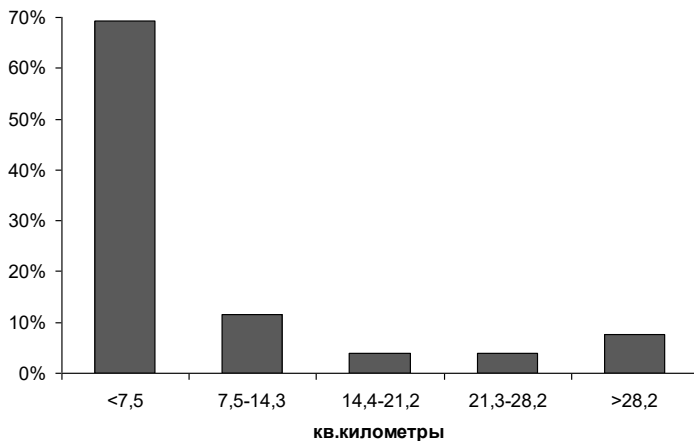


Рис. 7. Гистограмма повторяемость площади выпадения осадков (град с дождем) из одноячейковых градовых облаков (в период максимального развития ячеек).

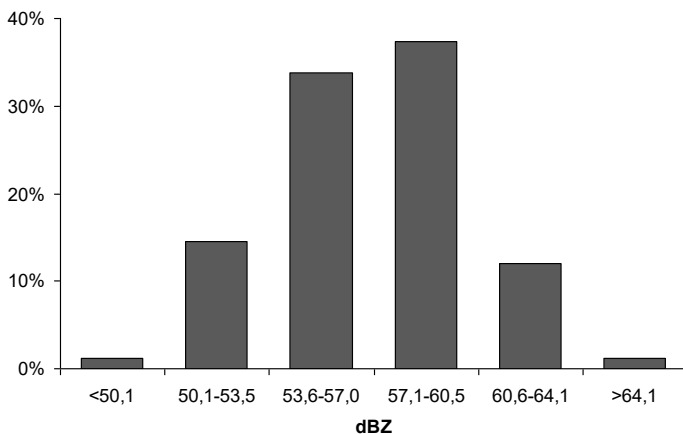


Рис. 8. Гистограмма повторяемости максимальной радиолокационной отражаемости Z_{10} (в период максимального развития ячеек).

Площадь выпадения градовых осадков из отдельных градовых ячеек в период их максимального развития в 92 % случаев не превышает 34 км² (рис. 7). Среднее значение площади выпадения града для рассмотренных градовых ячеек составило 9,9 км² при стандартном отклонении 14,6 км².

Максимальная отражаемость Z_{10} отдельных градовых ячеек в период их максимального развития в 86 % случаев не превосходит 61 dBZ (рис. 8). Минимальная отражаемость составляла 47 dBZ, максимальная — 68 dBZ. Среднее значение отражаемости для рассмотренных градовых ячеек в период их максимального развития составило 57 dBZ при стандартном отклонении 3,5 dBZ.

Таблица 1

**Статистические параметры одноячейковых градовых облаков,
полученные по радиолокационным данным**

Параметры облака (ячейки)	Среднее	Стандартное отклонение	Интервал	Вероятность попадания в интервал, %
Скорость перемещения, км/ч	12,1	6,5	2—18	84
Направление перемещения, градусы	185	94,7	149—360	66
Расстояние перемещения, км	9,8	6,7	3—15	86
Время жизни, мин	45	12,3	30—60	83
Время достижения градового состояния, мин	17	7	7—28	94
Высота верхней границы при максимальном развитии, км	9,1	1,7	7,0—11,4	83
Площадь выпадения града, км ²	9,9	14,6	1—34	92

В табл. 1 представлены статистические данные об одноячейковых грозовых облаках, наблюдавшихся на территории Северного Кавказа в летние периоды 2011—2016 гг.

Заключение

В настоящей работе разработка эмпирической модели конвективных облаков различных типов, наблюдаемых на Северном Кавказе, получила дальнейшее развитие (Абшаев, 1984; Инюхин и др., 2013; Абшаев и др., 1976; Салуквадзе и др., 2008; Аппаева и др., 2017; Аппаева, Чередник, 2018).

На основе обработки обширного экспериментального материала получены распределения основных радиолокационных параметров градовых облаков различных типов.

Построена физико-статистическая модель одноячейковых градовых облаков, описывающая характер природной изменчивости формирования и развития отдельных градовых ячеек, определяющая области вариации их основных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев М. Т. и др. (1976). Некоторые результаты радиолокационных исследований структуры и динамики развития грозо-градовых процессов Северного Кавказа // Труды ВГИ. Вып. 33. С. 81—91.

Абшаев М. Т. (1984). Структура и динамика развития грозо-градовых процессов Северного Кавказа // Труды ВГИ. Вып. 53. С. 6—22.

Аппаева Ж. Ю., Березинский И. Н., Инюхин В. С., Чередник Е. А. (2017). Некоторые особенности развития одноячейковых градовых облаков на Северном Кавказе // В сб.: Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на градовые процессы. Ч. 1. — Уфа: НИЦ «АЭТЕРНА». С. 237—245.

Аппаева Ж. Ю., Чередник Е. А. (2018). Особенности распределения основных радиолокационных характеристик одноячейковых градовых облаков Северного Кавказа // В сб.: Сборник научных трудов третьей международной научной конференции с элементами научной школы. — Ставрополь: ВГИ. С. 35—39.

Инюхин В. С. (2014). База радиолокационных данных // Труды ВГИ. Вып. 99. С. 52—60.

Инюхин В. С., Малкаров А. С., Чередник Е. А. (2013). Динамические характеристики градовых процессов // В сб.: Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. — Нальчик: ООО «Печатный двор». С. 199—207.

Руководство по краткосрочным прогнозам погоды (1987). Ч. 2. Вып. 1. — Л.: Гидрометеоиздат. 297 с.

Салуквадзе Т. Г., Хелая Э. И., Балавадзе А. Ш., Киладзе Р. И. (2008). Эмпирическая радиолокационная модель суперячейкового конвективного облака // Труды Института геофизики им. И. Нодия. Т. LX. С. 242—246.

Федченко Л. М., Гораль Г. Г., Беленцова В. А., Мальбахова Н. М. (1991). Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. — М.: Гидрометеоиздат. 424 с.

Marwitz J. D. (1972). The structure and motion of severe hailstorms // J. Appl. Met. V. 11. Parts I—III. P. 166—201.

**ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ,
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИМИ ВАРИАЦИЯМИ
ТОКОВ ГРОВОЗОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В МОДЕЛИ
ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ В АТМОСФЕРЕ**

В. Н. Морозов

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: vn.morozov@inbox.ru

Поступила в редакцию 13.11.2018
Поступила после доработки 15.12.2018

Введение

Исследованию нестационарных моделей глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в атмосфере посвящен ряд работ российских (Морозов, 2005; Калинин и др., 2014) и зарубежных исследователей (Ricroft et al., 2010; Jansky, Pasko, 2014). Основная цель этих исследований определялась необходимостью исследовать переходную стадию установления стационарного состояния атмосферы при включении в некоторый момент времени грозовых генераторов. К этой проблеме примыкает задача о рассмотрении влияния молниевых разрядов различных типов на параметры ГЭЦ (Морозов, 2013). Ранее в работе (Морозов и др., 2018) рассматривалась задача о влиянии гармонического изменения ионосферных электрических полей на их проникновение в нижние слои атмосферы. В настоящей статье исследуется влияние гармонического изменения тока грозового генератора на электрическое поле нижней атмосферы.

Постановка задачи и ее решение

Основное уравнение, которое используется для решения поставленной задачи, имеет следующий вид (Морозов, 2005; Морозов и др., 2018):

$$\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \varphi + \nabla(\lambda \nabla \varphi) = \text{div} \vec{j}_{cm}, \quad (1)$$

где: \vec{j}_{cm} — плотность стороннего тока, определяемого грозвым генератором, λ — электрическая проводимость атмосферы, φ — потенциал электрического поля.

В дальнейшем предполагается, что электрическая проводимость атмосферы имеет экспоненциальный характер: $\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}$, где $\alpha = 0,2 \dots 0,3 \text{ км}^{-1}$, r — радиальное расстояние от центра Земли, R — радиус Земли.

Обратимся к рассмотрению случая, когда ток грозового генератора меняется по гармоническому закону: $I_{cs}(t) = I_{cs0} e^{i\omega t}$. В этом случае, записывая уравнение (1) в сферической системе координат (r, θ, ϕ) , предполагая, что потенциал электрического поля изменяется также по гармоническому закону $\varphi(r, \theta, \phi, t) = e^{i\omega t} \bar{\varphi}(r, \theta, \phi)$, разлагая функцию $\bar{\varphi}(r, \theta, \phi)$ по сферическим гармоникам $Y_{ij}(\theta, \phi)$, заменяя параметр преобразования Лапласа на $i\omega$ (Морозов, 2005, 2011), получим уравнение:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 \bar{\varphi}_{ij}}{dr^2} + \left(\frac{2}{r} + \frac{\alpha \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}}{\frac{i\omega}{4\pi} + \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}} \right) \frac{d \bar{\varphi}_{ij}}{dr} - \frac{\mu \bar{\varphi}_{ij}}{R^2} = \bar{S}_{ij}(z, i\omega) = \\ & = - \sum_{s=1}^N \frac{I_{cs0}}{R^2} \frac{[\delta(r - r_{s0}) - \delta(r - r_{s1})]}{\frac{i\omega}{4\pi} + \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}} Y_{ij}^*(\theta_s, \varphi_s) \end{aligned} \quad (2)$$

где: $\mu = i(i + 1)$, $i = 0, 1, 2, \dots$ $\delta(x)$ — функция Дирака.

Рассмотрим вначале случай решения уравнения (2), удовлетворяющего условию: $4\pi\lambda_0 e^{\alpha(r-R)} / i\omega \ll 2 / \alpha R \approx 1,5 \times 10^{-3}$, и при выполнении этого условия уравнение (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{\varphi}_{ij}}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\bar{\varphi}_{ij}}{dr} - \frac{\mu \bar{\varphi}_{ij}}{r^2} = \bar{S}_{ij}(z, i\omega) = \\ = - \sum_{s=1}^N \frac{4\pi I_{cs0}}{r^2} \frac{[\delta(r-r_{s0}) - \delta(r-r_{s1})]}{i\omega} Y_{ij}^*(\theta_s, \varphi_s) \end{aligned} \quad (3)$$

Решение уравнения (3) сводится к следующему (Морозов, 2005):

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi_\infty \left(1 - \frac{R}{r}\right) + \sum_{s=1}^N Q_{cs0} \left[\left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_{s0}|} - \frac{R}{r_{s0} \left| \vec{r} - \frac{R^2}{r_{s0}^2} \vec{r}_{s0} \right|} \right) - \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_{s1}|} - \frac{R}{r_{s1} \left| \vec{r} - \frac{R^2}{r_{s1}^2} \vec{r}_{s1} \right|} \right) \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$Q_{cs0} = I_{cs0} / i\omega$$

Полученное решение описывает бестоковый режим в атмосфере, точнее равен нулю ток проводимости, а ток смещения отличен от нуля. Потенциал ионосферы $\varphi_\infty(\omega)$ определяется в этом случае из условия:

$$\oint i\omega \vec{E} d\vec{S} = 0$$

Решение уравнения (2) при $\left| \frac{e^{\alpha z}}{i\omega\tau_0} \right| < 1$ представляется в виде (Морозов, 2011):

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{ij} &= c_{1,ij}y_1 + c_{2,ij}y_2 - y_1 \int_0^z \frac{\bar{S}_{ij}(z', i\omega)}{\Delta(z')} y_2 dz' + y_2 \int_0^z \frac{\bar{S}_{ij}(z', i\omega)}{\Delta(z')} y_1 dz' \\ y_1 &= \left(-\frac{1}{i\omega\tau_0} e^{\alpha z} \right)^{\bar{\alpha}_1} F(\bar{\alpha}_2, \bar{\beta}_2, \gamma_1, -\frac{1}{i\omega\tau_0} e^{\alpha z}) \\ y_2 &= \left(-\frac{1}{i\omega\tau_0} e^{\alpha z} \right)^{1-\gamma_1+\bar{\alpha}_1} F(\bar{\alpha}_2 - \gamma_1 + 1, \bar{\beta}_2 - \gamma_1 + 1, 2 - \gamma_1, -\frac{1}{i\omega\tau_0} e^{\alpha z}) \\ \Delta(z) &= y_1 y_2' - y_1' y_2 = -\frac{2xi\omega}{i\omega + 4\pi\lambda(z)}, \quad y_m' = \frac{dy_m}{dz}, \quad m = 1, 2 \\ \bar{\alpha}_1 &= \frac{x}{\alpha}, \quad \bar{\alpha}_2 = \frac{x}{\alpha} + \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} \right), \quad \bar{\beta}_2 = \frac{x}{\alpha} + \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} \right), \\ \gamma_1 &= 1 + \frac{2x}{\alpha}, \quad x = \sqrt{\mu} / R \end{aligned} \quad (5)$$

При $\left| i\omega\tau_0 e^{-\alpha z} \right| < 1$ решение уравнения (2) представляется в виде:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{ij} &= C_{1,ij}\bar{y}_1 + C_{2,ij}\bar{y}_2 - \bar{y}_1 \int_0^z \frac{\bar{S}_{ij}(z', i\omega)}{\Delta(z')} \bar{y}_2 dz' + \bar{y}_2 \int_0^z \frac{\bar{S}_{ij}(z', i\omega)}{\Delta(z')} \bar{y}_1 dz' \\ \bar{y}_1 &= (-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})^{\alpha_1} F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) \end{aligned}$$

$$\bar{y}_2 = (-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})^{1-\gamma_1+\alpha_1} F(\bar{\alpha} - \gamma + 1, \bar{\beta} - \gamma + 1, 2 - \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})$$

$$\bar{\Delta}(z) = -\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} \frac{\alpha i \omega}{i\omega + 4\pi\lambda(z)}$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} + 1 \right), \quad \bar{\alpha} = \frac{x}{\alpha} + \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} + 1 \right), \\ \bar{\beta} &= -\frac{x}{\alpha} + \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} + 1 \right), \quad \gamma = 1 + \sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}}, \quad x = \sqrt{\mu} / R \end{aligned} \quad (6)$$

Решение, соответствующее высотам $z < h(\omega) = \alpha^{-1} \ln|i\omega\tau_0|$, следует из (2):

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(\omega, z, \theta, \phi) &= \bar{\varphi}_\infty(\omega) \left(1 - \frac{\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})}{\ln(1 + i\omega\tau_0)} \right) + \\ &+ \sum_{s=1}^N \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \frac{4\pi I_{cs0}}{xi\omega R^2} Y_{ij}^*(\theta_s, \phi_s) Y_{ij}(\theta, \phi) \frac{(shxz_{s0} - shxz_{s1})}{shxh(\omega)} shx(h(\omega) - z). \end{aligned}$$

$$z > \max\{z_{s0}\},$$

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(\omega, z, \theta, \phi) &= \bar{\varphi}_\infty(\omega) \left(1 - \frac{\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})}{\ln(1 + i\omega\tau_0)} \right) + \\ &+ \sum_{s=0}^N \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \frac{4\pi I_{cs0}}{xi\omega R^2} Y_{ij}^*(\theta_s, \phi_s) Y_{ij}(\theta, \phi) \frac{(shx(h(\omega) - z_{s0}) - shx(h(\omega) - z_{s1}))}{shxh(\omega)} shxz \end{aligned}$$

$$z < \min\{z_{s1}\} \quad (7)$$

При

$$x = \sqrt{i(i+1)} / R, \quad i = 0, 1, 2, \dots,$$

$$\operatorname{sh}xz_{s_0} \approx xz_{s_0}, \quad \operatorname{sh}xz_{s_1} \approx xz_{s_1},$$

$$\operatorname{sh}x(h(\omega) - z) \approx x(h(\omega) - z), \quad \operatorname{sh}xh(\omega) \approx xh(\omega)$$

где R — радиус Земли, равный 6400 км, вместо выражений (4) получим:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(\omega, z, \theta, \phi) = & \bar{\varphi}_\infty(\omega) \left(1 - \frac{\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})}{\ln(1 + i\omega\tau_0)}\right) + \\ & + \sum_{s=1}^N \frac{4\pi I_{cs0}}{i\omega R} \frac{(z_{s0} - z_{s1})}{h(\omega)} \frac{(h(\omega) - z)}{R} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2i+1}{4\pi} P_i(\cos \gamma_s) \end{aligned}$$

$$z > \max\{z_{s0}\}$$

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(\omega, z, \theta, \phi) = & \bar{\varphi}_\infty(\omega) \left(1 - \frac{\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})}{\ln(1 + i\omega\tau_0)}\right) + \\ & + \sum_{s=0}^N \frac{4\pi I_{cs0}}{i\omega R} \frac{(z_{s1} - z_{s0})}{h(\omega)} \frac{z}{R} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2i+1}{4\pi} P_i(\cos \gamma_s) \end{aligned}$$

$$z < \min\{z_{s1}\}, \quad (8)$$

где $P_i(\cos \gamma_s)$ — полином Лежандра.

Высота переходной границы $h(\omega)$ характеризует переход от области, где электрическая проводимость не играет роли, в область, где ее влияние существенно. В таблице 1 представлена зависимость этой величины от частоты ω .

Таблица 1

Зависимость высоты переходной границы $h(\omega)$ от частоты ω

$\omega = 2\pi/T, \text{ c}^{-1}$	628	62,8	6,28	0,628	0,0628	0,00628
$T, \text{ c}$	0,01	0,1	1	10	100	1570
$h(T) = h(\omega) \text{ км}$	60	50	40	20	10	0

Как видно из этой таблицы, при достаточно низких частотах $h(T) = h(\omega)$ обращается в нуль.

Поэтому при $|i\omega\tau_0|=1$, $h(\omega) = 0$, используя решение (6) (Морозов, 2011), получим:

$$\bar{\varphi} = \bar{\varphi}_\infty(\omega) \left[1 - \frac{\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)})}{\ln(1 + i\omega\tau_0)} \right] + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \bar{\varphi}_{ij}^{(1)} Y_{ij}(\theta, \phi), \quad r < r_{s\min}$$

$$\bar{\varphi} = \bar{\varphi}_\infty(\omega) \left[1 - \frac{\ln(1 + \omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)})}{\ln(1 + \omega\tau_0)} \right] + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^i \bar{\varphi}_{ij}^{(2)} Y_{ij}(\theta, \phi), \quad r > r_{s\max} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{ij}^{(1)} = & \sum_{s=1}^N \frac{4\pi I_{cs0} \tau_0}{\alpha \sqrt{1+4s_i}} \left\{ \frac{1}{r_{s0}^2} e^{-\alpha/2(z+z_{s0})} \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s0}-R)})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0)} \times \right. \\ & \times [F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0) \cdot F(a, b, c, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)}) e^{\frac{\alpha}{2}(z_{s0}-z)\sqrt{1+4s_i}} - \\ & - F(a, b, c, -i\omega\tau_0) \cdot F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)}) e^{\frac{\alpha}{2}(z_{s0}+z)\sqrt{1+4s_i}}] - \\ & - \frac{1}{r_{s1}^2} e^{-\alpha/2(z+z_{s1})} \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s1}-R)})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0)} \times \\ & \times [F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0) \cdot F(a, b, c, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)}) e^{\frac{\alpha}{2}(z_{s1}-z)\sqrt{1+4s_i}} - \\ & - F(a, b, c, -i\omega\tau_0) \cdot F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)}) e^{\frac{\alpha}{2}(z_{s1}+z)\sqrt{1+4s_i}}] \} Y_{ij}^*(\theta_s, \phi_s) \\ & r < r_{s\min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{ij}^{(2)} = & \sum_{s=1}^N \frac{4\pi I_{cs0} \tau_0}{\alpha \sqrt{1+4s_i}} \left\{ \frac{1}{r_{s0}^2} e^{-\alpha/2(z+z_{s0})} \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0)} \times \right. \\ & \times [F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0) \cdot F(a, b, c, -p\tau_0 e^{-\alpha(r_{s0}-R)}) e^{\frac{\alpha}{2}(z-z_{s0})\sqrt{1+4s_i}} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -F(a, b, c, -i\omega\tau_0) \cdot F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s0}-R)}) e^{-\frac{\alpha}{2}(z_{s0}+z)\sqrt{1+4s_i}} \Big] \\
& \quad - \frac{1}{r_{s0}^2} e^{-\alpha/2(z+z_{s1})} \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0)} \times \\
& \quad [F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0) \cdot F(a, b, c, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s1}-R)}) e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_{s1})\sqrt{1+4s_i}} - \\
& \quad - F(a, b, c, -i\omega\tau_0) \cdot F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s1}-R)}) e^{-\frac{\alpha}{2}(z_{s1}+z)\sqrt{1+4s_i}} \Big] \times Y_{ij}^*(\theta_s, \phi_s) \\
& \quad \quad \quad r > r_{s\max}, \tag{10}
\end{aligned}$$

где $z_{s0} = r_{s0} - R$, $z_{s1} = r_{s1} - R$, $z = r - R$, $s_i = i(i+1)/R^2\alpha^2$
 $a = \bar{\alpha} - \gamma + 1$, $b = \bar{\beta} - \gamma + 1$, $c = 2 - \gamma$;
 $F(u, \gamma, z, x)$ — гипергеометрическая функция.

Как видно из полученных решений (4)—(6), они состоят из двух частей: первая часть определяет глобальную часть электрического поля, создаваемую грозowymi генераторами и определяемую потенциалом ионосферы φ , а вторая часть определяет локальную часть электрического поля, создаваемую каждым грозowym генератором в отдельности.

При $|i\omega\tau_0| \ll 1$, используя методику расчета, развитую в монографии В. Н. Морозова (2011), получим квазистационарное решение, соответствующее решению Хольцера—Саксона (Holzer, Saxon, 1952), которое имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
\varphi_2 = & \sum_{s=1}^N \frac{I_{cs0}}{4\pi\lambda(z_{s0})} e^{\frac{\alpha}{2}(z-z_{s0})} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R_{1s0}}}{R_{1s0}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R'_{1s0}}}{R'_{1s0}} \right] \\
& - \sum_{s=1}^N \frac{I_{cs0}}{4\pi\lambda(z_{s1})} e^{\frac{\alpha}{2}(z-z_{s1})} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R_{1s1}}}{R_{1s1}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R'_{1s1}}}{R'_{1s1}} \right] \tag{11}
\end{aligned}$$

где $R_{1s0} = \sqrt{r^2 + r_{s0}^2 - 2r_{s0}r \cos \gamma_{s0}}$, $R_{1s1} = \sqrt{r^2 + r_{s1}^2 - 2r_{s1}r \cos \gamma_{s1}}$ —
 расстояния от грозового генератора до точки наблюдения,
 γ_{si} — угол между направлением на зарядовый источник
 и точкой наблюдения, $i = 0, 1$.

Вариации потенциала ионосферы, обусловленные гармоническими колебаниями тока грозового генератора

Как видно из представленных выше решений, в глобальную часть
 решений входит потенциал ионосферы ϕ_∞ , который также
 необходимо определить.

Используя результаты работы (Морозов, 1990), получим
 следующие выражения для потенциала ионосферы и электрического
 поля в областях «хорошей погоды»:

$$\phi_\infty = \phi_\infty^0 e^{i\omega t} = -\frac{1}{i\omega\alpha R^2} \sum_{s=1}^N \{ I_{s0} [\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s0}-R)}) - \ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s1}-R)})] e^{i\omega t} \} \quad (12)$$

$$\varphi(r, t) = \varphi_\infty^0 \left[1 - \frac{\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)})}{\ln(1 + i\omega\tau_0)} \right] e^{i\omega t}. \quad (13)$$

Рассмотрим некоторые предельные случаи, которые следуют из
 (12) и (13). При выполнении неравенства $|i\omega\tau_0| \ll 1$ гармонические
 колебания потенциала ионосферы и потенциала электрического поля
 атмосферы происходят синфазно с колебаниями электрического тока
 грозовых генераторов. В этом случае, разлагая логарифмические
 функции, входящие в (12) и (13), в ряд Маклорена, получим решения,
 соответствующие стационарному случаю, умноженные на $e^{i\omega t}$.

Другой предельный случай соответствует выполнению условий: $\left| i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s0}-R)} \right| \gg 1$, $\left| i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r_{s1}-R)} \right| \gg 1$. В этом случае из приведенных выше неравенств следуют неравенства: $r_{s0} - R \ll \frac{1}{\alpha} \ln i\omega\tau_0$, $r_{s1} - R \ll \frac{1}{\alpha} \ln i\omega\tau_0$.

Потенциал ионосферы в этом приближении представляется в виде:

$$\varphi_\infty(t) = \sum_{s=1}^N \frac{I_{s0}}{i\omega R^2} (h_{s0} - h_{s1}) e^{i\omega t} = \sum_{s=1}^N \frac{Q_{s0}(\omega)}{R^2} (h_{s0} - h_{s1}) e^{i\omega t}, \quad (14)$$

где $Q_{s0}(\omega) = I_{s0} / i\omega$; h_{s0} , h_{s1} — расстояния положительного и отрицательного зарядов над земной поверхностью.

В этом случае для потенциала ионосферы $\varphi_\infty(t)$ характерно чисто электростатическое изменение со временем, не зависящее от электрической проводимости атмосферы.

Если выполнено условие $\left| i\omega\tau_0 e^{-\alpha(r-R)} \right| \gg 1$, то выражение (2) приобретает следующий вид:

$$\varphi(r,t) = \varphi_\infty^0 \frac{r-R}{h(\omega)} e^{i\omega t}, \quad h(\omega) = \frac{1}{\alpha} \ln i\omega\tau_0. \quad (15)$$

Рассмотренные случаи показывают, что с точки зрения глобальной электрической цепи первый случай соответствует существенному влиянию токов проводимости на процесс формирования потенциала ионосферы, а второй — преобладанию токов смещения, причем в этом случае высокочастотная составляющая потенциала ионосферы значительно ослаблена по сравнению с низкочастотной квазистационарной составляющей.

Выводы

В электростатическом приближении с учетом экспоненциально растущей электрической проводимости атмосферы получено решение задачи о влиянии гармонических колебаний тока грозового генератора на электрическое поле атмосферы. Анализ полученных решений, описывающих распределение электрического потенциала в атмосфере в зависимости от частоты колебаний тока грозового генератора, показал наличие трех случаев. Первый случай (случай высоких частот) соответствует кулоновскому приближению, когда электрическую проводимость можно не учитывать. В случае низких частот (второй случай), когда частота колебаний тока грозового генератора меньше величины обратного времени электрической релаксации, когда изменение электрического потенциала подстраивается к изменениям тока генератора. В третьем случае вследствие роста электрической проводимости атмосферы возникают две сферические области, в нижней имеет место кулоновское приближение, а в верхней текут токи проводимости. Верхняя граница, находящаяся на высоте $h(\omega) = \alpha^{-1} \ln i\omega t$, экранирует электрические поля грозовых генераторов.

Аналогичная ситуация имеет место и для потенциала ионосферы, являющейся глобальной характеристикой электрического поля атмосферы. В случае низких частот гармонические колебания потенциала ионосферы происходят синфазно с колебаниями тока генератора. В случае высоких частот потенциал ионосферы не зависит от электрической проводимости, и его колебания носят электростатический характер.

Приложение А

Рассмотрим приближенное представление для решения уравнения (6) для случая одного источника. Преобразуя соответствующее выражение, получим:

$$\begin{aligned}
\varphi_2 = & \frac{I_{c1} e^{i\omega t}}{4\pi\lambda(z_{10})} e^{\frac{\alpha}{2}(z-z_{10})} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R_{110}}}{R_{110}} \frac{i\omega\tau_0}{\ln(1+i\omega\tau_0)} F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) \times \right. \\
& \times F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R'_{110}}}{R'_{110}} F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z_{10}}] - \frac{I_{c1} e^{i\omega t}}{4\pi\lambda(z_{11})} e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_{11})} \times \\
& \times [e^{\frac{\alpha}{2}R_{111}} / R_{111} \frac{i\omega\tau_0}{\ln(1+i\omega\tau_0)} F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z_{11}}) \times F(1,1,2,i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) - \\
& \left. - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R'_{111}}}{R'_{111}} F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) \right] \\
& z < z_{11}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varphi_2 = & \frac{I_{c1} e^{i\omega t}}{4\pi\lambda(z_{10})} e^{\frac{\alpha}{2}(z-z_{10})} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R_{110}}}{R_{110}} F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) - \right. \\
& \left. - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R'_{110}}}{R'_{110}} \frac{i\omega\tau_0}{\ln(1+i\omega\tau_0)} \times F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z_{10}}) F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) \right] - \\
& - \frac{I_{c1} e^{i\omega t}}{4\pi\lambda(z_{11})} e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_{11})} \left[e^{\frac{\alpha}{2}R_{111}} / R_{111} F(1,1,2,i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) - \right. \\
& \left. - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}R'_{111}}}{R'_{111}} \frac{i\omega\tau_0}{\ln(1+i\omega\tau_0)} F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) F(1,1,2,-i\omega\tau_0 e^{-\alpha z_{11}}) \right] \\
& z > z_{10}
\end{aligned} \tag{A1}$$

Здесь использовалось следующее выражение для функции $F(1, 1, 1, x)$ (Камке, 1971):

$$F(1,1,2,-x) = \frac{\ln(1+x)}{x} \tag{A2}$$

Подставляя (A2) в (A1) и переходя к пределу при $\omega t \rightarrow 0$, получим выражение (7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Калинин А. В., Слюняев Н. Н., Мареев Е. А., Жидков А. А. (2014). Стационарные и нестационарные модели глобальной электрической цепи: корректность, аналитические соотношения, численная реализация // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Том 50. № 3. С. 355—364.

Камке Э. (1971). Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М.: Наука. 576 с.

Морозов В. Н. (1990). Влияние нестационарной составляющей грозовых процессов на электрическое состояние атмосферы / В сб.: Вопросы атмосферного электричества. — Л.: Гидрометеоиздат. С. 147—157.

Морозов В. Н. (2005). Модель нестационарного электрического поля в нижней атмосфере / Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 45. № 2. С. 268—278.

Морозов В. Н. (2011). Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ — СПб: РГТУ. 253 с.

Морозов В. Н. (2013). Влияние молниевых разрядов грозовых облаков на глобальную электрическую цепь // Труды ГГО. Вып. 569. С. 249—257.

Морозов В. Н., Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г. (2018). Глобальная электрическая цепь в атмосфере: теоретические модели и экспериментальные данные // Труды ГГО. Вып. 589. С. 98—113.

Holzer R. E., Saxon D. S. (1952). Distribution of electrical conduction current in the vicinity of thunderstorms // J. Geophys. Res. V. 57. № 2. P. 207—216.

Jansky J., Pasko V. P. (2014). Charge balance and ionospheric potential dynamics in time-dependent global electric circuit model // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 119. P. 10.184—10.203.

Rycroft M. J., Odzimek A. (2010). Effects of lightning and sprites on the ionospheric potential and threshold effects on sprite initiation, obtained using an analog model of the global atmospheric electric circuit // J. Geophys. Res. V. 115. № A0027. doi:10/1029JA 014738.

**ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА ЕСТЕСТВЕННЫХ
ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА
КРУПНОМАСШТАБНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ**

*Е. В. Ракушина, К. К. Кандиева,
О. Г. Анискина, А. И. Погорельцев*

Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79
E-mail: zhenya_rakushina@mail.ru

Поступила в редакцию 2.12.2018
Поступила после доработки 20.12.2018

Введение

В геофизических исследованиях часто возникает необходимость аппроксимации полей для выявления основных закономерностей, удаления шумов или изменения размерности анализируемых массивов. В процессе анализа полей решаются задачи объективного контроля результатов наблюдений и ассимиляции, осуществляется физико-статистическое моделирование, сглаживание и фильтрация данных наблюдений и моделирования.

В настоящее время в качестве базисных функций используются различные степенные полиномы, тригонометрические и сферические функции, полиномы Чебышева, Лагранжа, Эрмита и т. п.

Степенные полиномы второй и третьей степеней неплохо аппроксимируют поля метеорологических величин в небольших областях, поэтому широко используются в методе конечных элементов, который сегодня все чаще используется при гидродинамическом моделировании атмосферных процессов. В глобальном гидродинамическом моделировании атмосферных процессов широко используют сферические функции (Репинская,

Бабич, 1999). Разложение по тригонометрическим функциям и вейвлет-анализ позволяет изучать особенности волновых мод различных пространственно-временных масштабов.

У всех упомянутых выше функций, используемых в качестве базисных, есть один недостаток — они фиксированы, формальны и напрямую не описывают особенности полей метеорологических величин и процессы, их формирующие.

Для уменьшения влияния искусственности, возникающей при использовании классических ортогональных многочленов, и лучшего анализа пространственно-временной структуры, начиная с 50-х годов XX в., применяют статистически оптимальные разложения, в которых в качестве базисных используют естественные (или эмпирические) ортогональные функции — ЕОФ. Главная особенность такой аппроксимации состоит в том, что при фиксированном числе членов ряда норма ошибки, рассчитанная по ансамблю реализаций случайных полей, минимальна, т. е. обеспечивается минимальная остаточная дисперсия по сравнению с любым формальным ортонормированным базисом.

Теоретические основы метода эмпирических ортогональных составляющих были заложены Э. Н. Лоренцом (Лоренц, 1977). Н. А. Багров разработал более компактный способ определения естественных ортогональных составляющих, основанный на применении теории матриц (Багров, 1958; 1959; 1960). А. М. Обухов отмечал, что использование ЕОФ может оказаться полезным для решения широкого круга геофизических задач, связанных с выявлением типичных процессов и с количественной оценкой их интенсивности (Обухов, 1960). Одна из лучших отечественных монографий, посвященных ЕОФ, — это работа сотрудников ГГО под руководством М. И. Юдина, которая вышла в свет в 1968 году. Сегодня интерес к разложению по ЕОФ возник снова, и об этом свидетельствуют многочисленные исследования, в которых применяется аппарат ЕОФ, способный значительно уменьшить размерность анализируемых полей. Современная точка зрения на методы разложения по ЕОФ подробно представлена в статье Н. М. Доценко и др. (2011).

С точки зрения статистики разложение корреляционной матрицы совокупности полей представляет собой разложение по наиболее часто встречающимся собственным элементам, которые обладают большими собственными числами (Репинская, Бабич, 1999). Поэтому процесс разложения совокупности полей можно трактовать как процесс последовательного определения наиболее часто встречающихся пространственных структур анализируемых полей, а также определения их весов в исследуемой совокупности.

Описание аппарата ЕОФ

Аналитическое представление метеорологических полей с использованием ЕОФ предполагает, что анализируемая величина задается временным рядом значений в дискретных точках пространства.

Рассмотрим функцию, которая зависит и от времени, и от пространства. Зависимость от пространства выражается в том, что переменные заданы в определенных (m) точках пространства (всего M точек), например в пунктах наблюдений или в узлах модельной сетки. Данные привязаны к конкретным дискретным моментам времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$. Следовательно, функцию $f_m(t_i)$ можно представить в виде ряда:

$$f_m(t_i) = \sum_{k=1}^M Y_{km} Q_k(t_i), \quad (1)$$

где Y_{km} — заранее неизвестная функция, которая не зависит от времени (эта функция является базисной и называется естественной ортогональной функцией (ЕОФ)); $Q_k(t_i)$ — коэффициенты разложения по ЕОФ, зависящие от времени.

Количество базисных функций не может превышать количества точек, в которых задана функция $f_m(t_i)$.

Количество членов разложения в (1) может быть меньше M и тогда получим усеченный ряд, который содержит не всю информацию о раскладываемой функции. Можно оценить ошибку усечения $\varepsilon_m^K(t_i)$:

$$f_m(t_i) = \sum_{k=1}^K Y_{km} Q_k(t_i) + \varepsilon_m^K(t_i) \quad (2)$$

Именно на основе (2) определяют базисные функции Y_{km} и коэффициенты разложения $Q_k(t_i)$. При этом для выбранного количества членов разложения (рассматриваемых гармоник) K суммарный квадрат ошибки (r_m^K) должен быть минимальным:

$$R^K = \sum_{m=1}^M (r_m^K)^2 \quad (3)$$

Лоренц еще в 1956 году доказал, что ошибка R^K будет минимальна, если выбрать ортогональные базисные функции Y_{km}

$$\sum_{m=1}^M Y_{km} Y_{jm} = \begin{cases} 1, & \text{если } k = j \\ 0, & \text{если } k \neq j \end{cases} \equiv \delta_{kj} \quad (4)$$

а амплитуды ЕОФ будут ортогональны во времени

$$\overline{Q_k^* Q_j^*} = a_k \delta_{kj},$$

$$a_k \geq a_{k+1} \geq 0. \quad (5)$$

Черта сверху означает осреднение по времени, а знак * — отклонение от среднего значения.

Вследствие выполнения свойств ортогональности во времени и в пространстве ЕОФ оптимальным образом представляют раскладываемые в ряд данные.

Сегодня разложение по ЕОФ очень часто используется для выявления структуры полей метеорологических величин. В данной работе приведены результаты исследований двух тропических колебаний — квазидвухлетнего колебания (КДК) и осцилляции Маддена—Джулиана с использованием ЕОФ анализа. Поскольку в современной русской и англоязычной литературе отсутствует единообразная терминология для обозначения характеристик ЕОФ-анализа, то сразу определим термины, используемые в данной статье. Собственным вектором будем называть базис, по которому раскладывается функция. Главной k -й компонентой будет называться проекция поля аномалий на k -й собственный вектор.

Исследование сигнала КДК в поле зонального ветра

Известно, что КДК влияет на глобальную атмосферную циркуляцию в тропосфере и стратосфере. КДК модулирует планетарные волны, тем самым оказывая влияние на циркуляцию средних широт, воздействует на процессы генерации и общую циркуляцию озона и других примесей в атмосфере, а также взаимодействует с таким важным для системы океан—атмосфера явлением как Эль-Ниньо / Южное Колебание (ЭНЮК).

КДК проявляется в чередовании ветровых режимов, которые зарождаются в тропической стратосфере и постепенно распространяются вниз от верхней стратосферы до тропопаузы со скоростью около 1 км в месяц. Требуется около 28 месяцев для совершения полного цикла колебания.

Существуют две фазы КДК: западная (экваториальное зональное движение воздуха с запада на восток) и восточная (с востока на запад). Нерегулярный вертикальный «спуск» аномалий относится к восточной фазе в большей степени, чем к западной. Амплитуда восточной фазы КДК примерно в два раза выше амплитуды западной фазы.

Число исследований, посвященных различным аспектам КДК (изучение структуры, механизма формирования, связи с атмосферной циркуляцией, тропическим циклогенезом и т. д.), непрерывно растет. Однако изучение самого КДК и сегодня остается актуальным. По-прежнему остается неясным, по данным какого изобарического уровня можно судить о фазе КДК. Этот уровень варьируется от 10 до 50 гПа (Scaife et al., 2014). Выбор уровня обосновывается значительными вариациями амплитуды ветра от фазы к фазе. Неопределенность в выборе уровня сказывается на результатах исследований. В стандартном подходе определения фазы КДК не учитывается временная эволюция на протяжении одной фазы, то есть не учитывается степень распространения аномалий зонального ветра в нижние слои атмосферы и влияние этих аномалий на атмосферные процессы.

В данном исследовании рассматривается возможность с использованием аппарата ЕОФ изучить вертикальную эволюцию фаз КДК, оценить значимость данных о ветре на каждом вертикальном уровне для выбора оптимального индикатора КДК, а также более точно классифицировать фазы КДК для изучения его влияния на процессы в атмосфере.

В исследовании использовались данные ре-анализа JRA-55 (Kobayashi et al., 2015). Аномалии зонального ветра в период 1958—2014 гг. предварительно сглаживались с использованием скользящего среднего за пять месяцев. Данные представлены на девяти изобарических уровнях (70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3 и 1 гПа), на каждом из которых поля зонального ветра были разложены в ряды по ЕОФ и проанализированы две первые главные компоненты (ГК1 и ГК2), которые представлены на рис. 1. Первая ЕОФ описывает 52,7 % дисперсии, вторая — 41,7 %, что в сумме составляет 94,4 %. Аппарат ЕОФ позволил уменьшить размерность данных практически без потерь информации, и по первым двум коэффициентам разложения (КР1 и КР2) можно судить об изменении амплитуды и фазы КДК:

$$\text{Амплитуда} = \left[\sqrt{\text{КР1}^2 + \text{КР2}^2} \right], \text{Фаза} = \left[\tan^{-1} \left(\frac{\text{КР2}}{\text{КР1}} \right) \right].$$

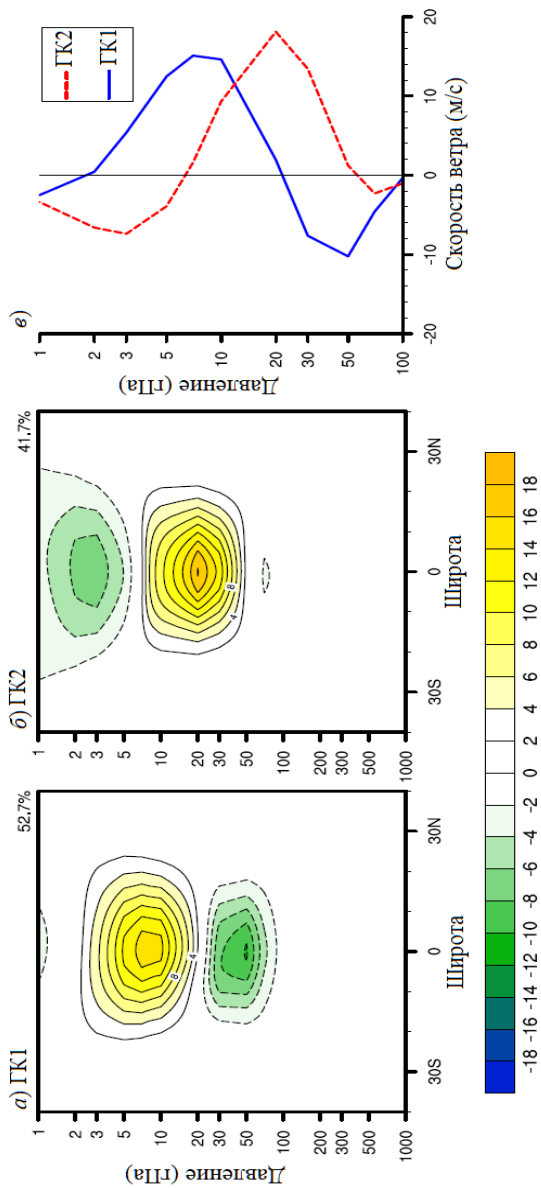


Рис. 1. Высотно-широтные разрезы в поле зонального ветра ГК1 (а) и ГК2 (б).
Вертикальные профили GK1 и GK2 на широте экватора (в).

Анализ ГК1 (рис. 1а и синяя линия на рис. 1б) показал наличие отрицательной корреляции между флуктуациями зонального ветра на поверхностях 7 и 50 гПа. Отрицательная корреляция на 3 и 20 гПа наблюдается и для ГК2 (рис. 1б и красная пунктирная линия на рис. 1в). Точки с резким изменением ГК1 на 7 и 50 гПа совпадают с моментами изменения направления ветра по ГК2. Амплитуда на 7 гПа выше амплитуды на 50 гПа. Исходя из полученных результатов, можно предположить, что уровень 7 гПа является определяющим для выбора фазы КДК. На этом уровне ГК1 выступает в роли основной моды, а ГК2 — знакопеременной.

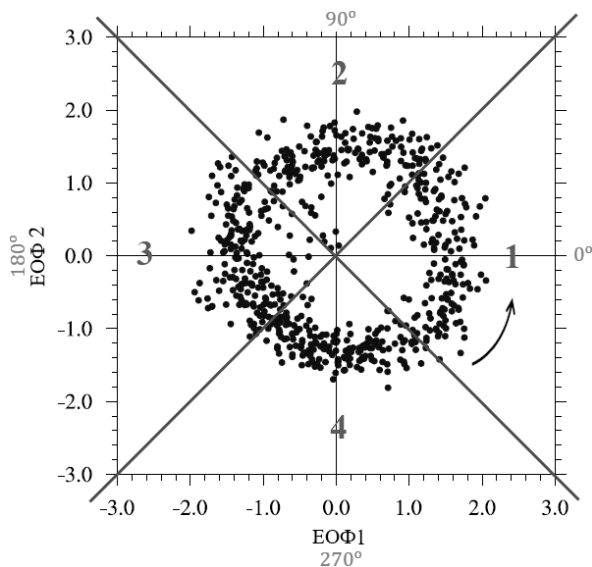


Рис. 2. Диаграмма рассеяния первых двух коэффициентов разложения по ЕОФ зонального ветра. Стрелка показывает направление перемещения точек во времени.

Вертикальная эволюция КДК может быть исследована с помощью первых двух коэффициентов разложения, представленных в двумерном пространстве. На рис. 2 по абсциссе отложены значения

первого коэффициента разложения, по ординате — второго коэффициента разложения.

Точка показывает значения первых двух коэффициентов разложения в каждый момент времени полного цикла КДК, за время которого точка совершает почти полный оборот в двумерном пространстве. Разделив это пространство на 4 части, можно выделить четыре состояния или типа КДК.

На рис. 3 приведены широтно-высотные разрезы аномалий зонального ветра для четырех типов КДК в период 1958—2014 гг.

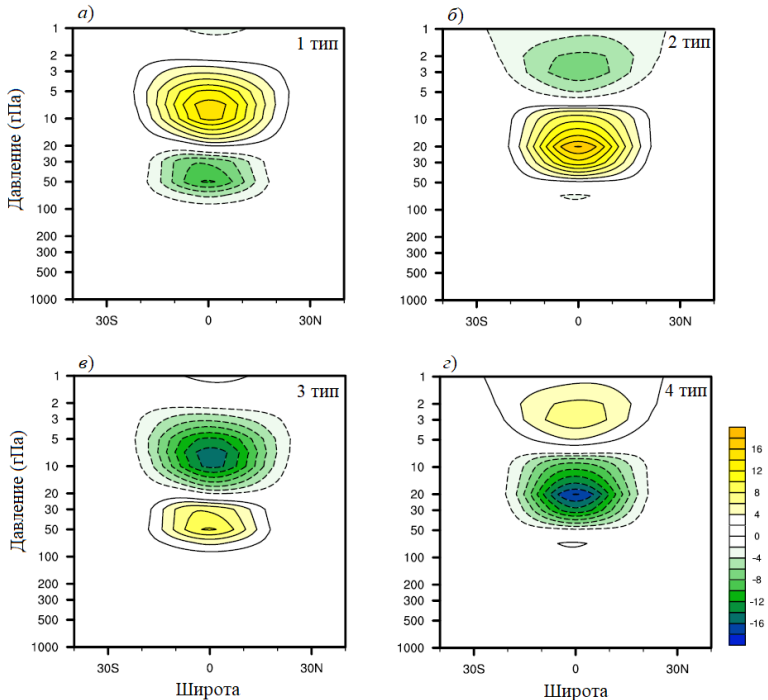


Рис. 3. Вертикальные разрезы среднего зонального ветра (м/с), соответствующие фазам КДК.

Если, например, рассматривать аномалии среднего зонального ветра относительно изобарической поверхности, на которой наблюдаются максимальные амплитуды 20 гПа, то можно выявить четыре типа КДК: для первого типа (рис. 3а) выбранная изобарическая поверхность 20 гПа выступает в роли границы между областями западного и восточного переноса; для второго типа (рис. 3б) на 20 гПа наблюдается максимум западного переноса; для третьего типа (рис. 3в) изобарическая поверхность 20 гПа — это граница между областями восточного и западного переноса; для четвертого типа (рис. 3г) на 20 гПа наблюдается максимум восточного переноса.

Из анализа разрезов видно распространение флуктуаций зонального ветра по вертикали, связанное с четырьмя фазами КДК. Виден процесс эволюции КДК — «спуск» максимальной флуктуации зонального ветра из стратосферы в тропосферу.

Для более детального анализа четырех типов КДК были получены значения индекса КДК (сумма значений зонального ветра на широте экватора на высоте 20 км) для трех месяцев — январь, февраль, март во временном интервале с 1958 по 2014 гг. Диаграмма зависимости индекса КДК для 1-го типа показана на рис. 4. Анализ показал, что во время 1-го типа наблюдаются различные стандартные фазы КДК (западная и восточная). Чаще всего западная, однако к 1-му типу можно отнести 1966, 1975 и 2006 годы, в которые наблюдалась сильная восточная фаза (значения индекса КДК по модулю больше 300 м/с). Можно отметить, что часто индекс КДК совпадает для февраля и марта, редко для января и марта, за весь рассматриваемый период только дважды значения индекса совпали для всех трех месяцев. Первый тип КДК можно назвать переходным, при котором направление потока меняется с восточного на западное.

Для всех годов, отнесенных ко 2-му типу, наблюдается стандартная западная фаза. Только в 1960 и 2013 гг. ветер имел восточное направление, но был слабее, чем в остальные годы. Таким образом, 2-й тип можно полностью отнести к западной фазе КДК.

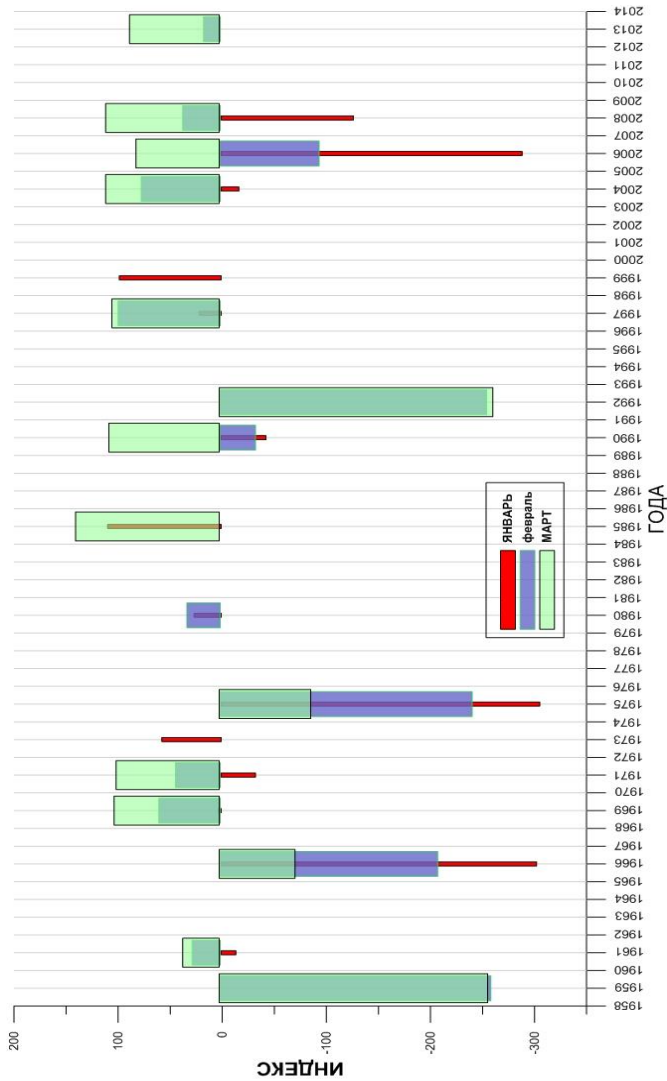


Рис. 4. Распределение КДК первого типа.

3-й тип можно отнести к переходному — с западного на восточный. Часто совпадают значения индексов двух последовательных месяцев, не только февраля и марта, как в случае первого типа, но и января и февраля. Вышесказанное позволяет говорить об инерционности процессов, наблюдаемых при этом типе КДК.

4-й тип относится к восточной фазе, во все три исследуемых месяца индексы КДК имели почти одинаковые по величине значения.

Анализ повторяемости четырех типов показал, что за весь рассматриваемый период во все месяцы преобладал 3-й тип КДК, то есть переходный от западного переноса к восточному. В таблице 1 приведены данные о повторяемости типов КДК в разные месяцы.

Таблица 1

Повторяемость фазы КДК в зимние месяцы

Месяц	Тип КДК			
	1-й	2-й	3-й	4-й
Январь	13	11	16	13
Февраль	14	13	17	11
Март	14	12	16	14

Анализ связи КДК и полей метеорологических величин выявил, что значимые отличия при разных фазах КДК наблюдаются в полях температуры и зонального ветра. Максимальные отличия наблюдаются в летний период в тропической зоне и в полярной области на высотах более 20 км. Влияние КДК имеет ярко выраженный профиль по вертикали в полях температуры и зонального ветра. Наиболее отличаются поля метеорологических величин при 2-м и 4-м типах, и это обоснованно, так как именно эти типы КДК соответствуют западной и восточной фазам.

Исследование сигнала ОМД

Осцилляция Маддена—Джулиана (ОМД) — это крупномасштабное колебание метеорологических характеристик в тропической

области, которое проявляется в возникновении кучевой облачности и ее перемещении в восточном направлении вдоль экватора со средней скоростью около 5 м/с и периодом от 30 до 60 суток. Развитие крупномасштабной конвективной ячейки ОМД начинается на западе Индийского океана, затем зона глубокой конвекции перемещается на восток, постепенно затухая по мере продвижения к восточной части Тихого океана.

Для характеристики ОМД широко используется индекс ОМД, предложенный в работе (Wheeler, Hendon, 2004) и использующий аппарат ЕОФ, так как первые два коэффициента разложения по ЕОФ описывают поведение ОМД. Коэффициенты разложения вычисляются по осредненным по тропической области данным о скорости зонального ветра в верхней и нижней тропосфере (200 гПа и 850 гПа) и данным об уходящей длинноволновой радиации (УДР), которые проецируются на ЕОФ. ЕОФ вычисляются для ковариационной матрицы, сформированной из ежедневных значений полей скорости ветра и УДР (всего 8401 дней в период с 1979 по 2001 гг.). Вычисленные таким образом два первых коэффициента разложения ($KP1$, $KP2$) определяют ежедневную амплитуду и фазу ОМД (мощность и положение облачности).

Данные амплитуды и фазы ОМД, с 1979 года по настоящее время, полученные с помощью описанного метода (Wheeler, Hendon, 2004), хранятся на сайте Центра климатических прогнозов NOAA. Однако существуют архивы данных с более длинными временными рядами наблюдений, применение которых позволит повысить статистические показатели результатов исследования. Одним из таких архивов данных является ре-анализ JRA-55, который и был использован в данном исследовании для вычисления амплитуды и фазы ОМД за период с 1958 по 2016 гг. На рис. 5 представлены ЕОФ1 и ЕОФ2 (два первых собственных вектора), полученные по методике (Wheeler, Hendon, 2004) для периода с 1959 по 1988 гг.

Две первые ЕОФ описывают не более 20 % дисперсии. Невысокое значение дисперсии можно объяснить тем, что в расчетах использованы данные о трех метеорологических величинах для всех

времен года и учтены процессы с различными пространственно-временными масштабами.

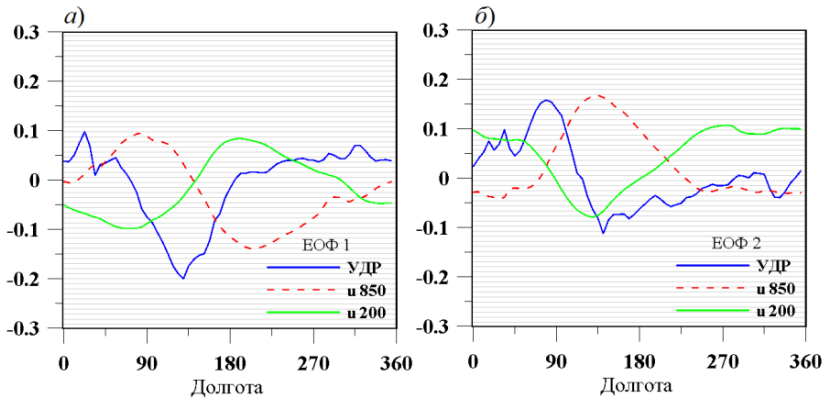


Рис. 5. Долготное распределение первых двух ЕОФ в поле УДР ($\text{Вт}/\text{м}^2$) (синяя линия), зонального ветра на 850 гПа (м/с) (красная пунктирная линия), зонального ветра на 200 гПа (м/с) (зеленая линия).
a — ЕОФ1, *б* — ЕОФ2.

ЕОФ1 описывает структуру ОМД, когда развитая кучевая облачность расположена над Индонезией и западной частью Тихого океана. Для ЕОФ2 облачность располагается над Тихим океаном. Ветровая структура ЕОФ1 схожа со структурой ЕОФ2: направление зонального ветра на уровнях 850 гПа противоположно его ходу на уровне 200 гПа.

Рис. 6 демонстрирует кривую средних значений амплитуды индекса за январь—февраль с 1958 по 2016 гг. по данным ре-анализа JRA-55 и кривую распределения средних значений амплитуды оригинального индекса ОМД по данным ре-анализа NCEP/NCAR с 1979 по 2016 гг. Полагают, что ОМД с амплитудой индекса ОМД меньше 1 — слабая осцилляция, если амплитуда индекса ОМД больше 1 — сильная осцилляция.

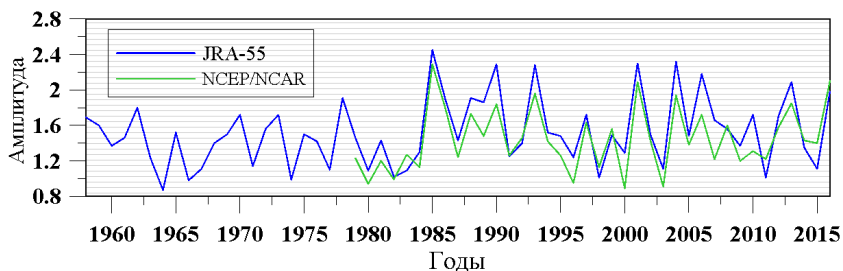


Рис. 6. Изменение средних значений амплитуды индекса ОМД за январь—февраль в период с 1958 по 2016 гг.

Анализ результатов, приведенных на рис. 6, показал, что в большинстве случаев средняя амплитуда ОМД больше 1 и позволил сделать вывод о развитии сильных осцилляций в зимнее время. Значение средней максимальной амплитуды события ОМД по данным JRA-55 с 1958 по 1980 гг. не превышает 1,75, а с 1980—2016 гг. наблюдаются более сильные осцилляции со средними значениями амплитуды больше 2.

Осцилляции Маддена—Джулиана может быть представлена в двумерном фазовом пространстве, координатами которого являются первые два коэффициента разложения, как и в случае с КДК (рис. 2). На основе этого в работе (Wheeler, Hendon, 2004) цикл ОМД разделен на 8 фаз. Время перехода между каждой фазой составляет 6 дней, но может меняться от события к событию. Схематически распространение аномалий УДР, связанных с ОМД, представлено на рис. 7, из которого следует, что облачность ОМД возникает над Африкой/западной частью Индийского океана (отрицательные значения УДР, 1-я фаза), аномалии распространяются вдоль экватора в восточном направлении (2—7 фаза), цикл ОМД завершается в восточной части Тихого океана одновременно с диссипацией облачности (8-я фаза). На картах, соответствующих 1-ой и 8-ой фазам, одновременно видны две области отрицательных аномалий УДР это области возникновения и рассеивания облачности ОМД.

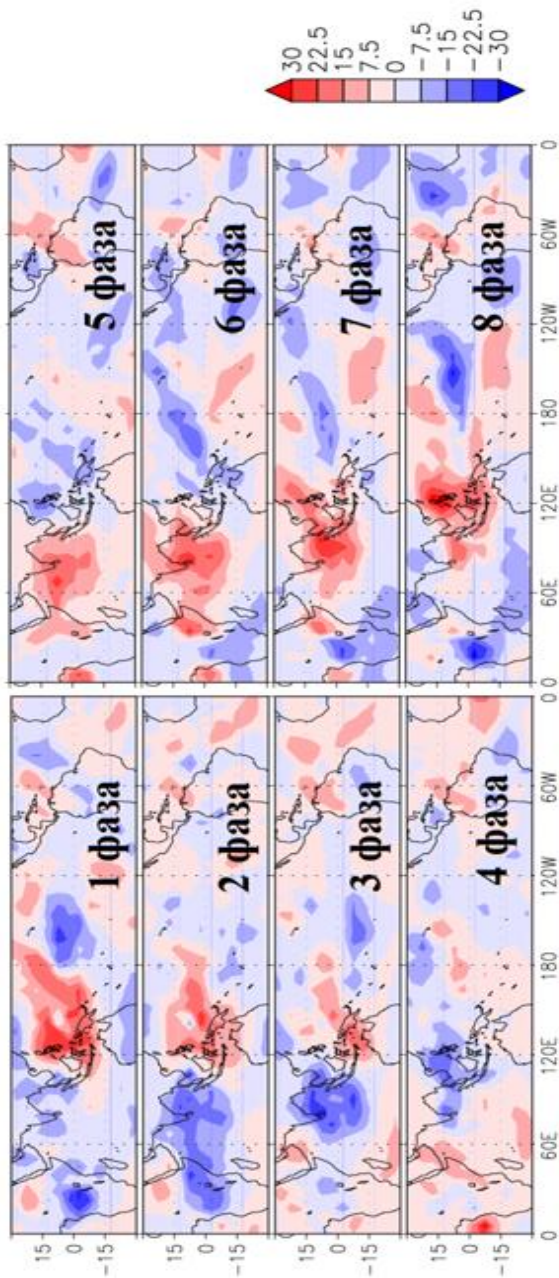


Рис. 7. Пространственное распределение аномалий УДР ($\text{Вт}/\text{м}^2$) для фаз ОМД, наблюдаемых в январе—феврале, по данным JRA-55 для периода 1958—1988 гг.

На рис. 7 видно, как облачность ОМД возникает над Африкой/западной частью Индийского океана (отрицательные значения УДР, 1-я фаза), аномалии распространяются вдоль экватора в восточном направлении (2—7 фазы), цикл ОМД завершается в восточной части Тихого океана одновременно с диссипацией облачности (8-я фаза). На картах, соответствующих 1-й и 8-й фазам, одновременно видны две области отрицательных аномалий УДР — это области возникновения и рассеивания облачности ОМД.

Полученная эволюционная схема ОМД позволяет выдвинуть ряд гипотез влияния ОМД на атмосферные процессы, в том числе и на стратосферный полярный вихрь. Согласно работе Кандиевой и др. (2018), развитие аномалий геопотенциала в полярной области зависит от положения облачности, связанного с ОМД. Различное положение облачности ОМД по-разному влияет на динамику стратосферы, например, аномалии, генерируемые ОМД, в северной части Тихого и в западной части Индийского океанов способны воздействовать на стационарную ложбину в Тихом океане и тем самым контролировать мощность стратосферного полярного вихря (Garfinkel et al., 2014). ОМД оказывает влияние на вид внезапных стратосферных потеплений: разделению полярного вихря предшествует более сильное событие ОМД, чем при смещении вихря (Liu et al., 2014). Более того было показано, что более половины случаев ВСП возникают, когда аномалии, связанные с ОМД, расположены в Тихом океане.

Заключение

В данной работе с помощью аппарата ЕОФ исследована эволюция и получены количественные оценки двух атмосферных процессов — КДК и ОМД.

Результаты работы показали, что структура естественных ортогональных функций не несет очевидной информации о вкладе КДК и ОМД в поля основных метеорологических величин. Влияние этих двух колебаний можно оценить, анализируя временной ход коэффициентов разложения по ЕОФ.

Дополнительно оценка коэффициентов разложения позволяет определить и амплитуду атмосферных процессов в конкретный момент времени. Важно понимать, что ЕОФ не всегда представляет собой существующие динамические колебания или колебания, имеющие физическую природу. Чаще всего, физический процесс скрывается в нескольких ЕОФ.

Исследование сигнала КДК в поле зонального ветра с помощью аппарата ЕОФ показало, что определение фазы КДК можно проводить на уровне 200 гПа, тогда вертикальное распространение аномалий зонального ветра выглядит следующим образом: 1) переходная фаза от восточной к западной; 2) западная фаза; 3) переходная фаза от западной к восточной; 4) восточная фаза.

Следовательно, аппарат ЕОФ позволил определить межфазовые переходы, которые указывают на вертикальную эволюцию фазы КДК и, возможно, применение подобного анализа фаз КДК позволит получить новые оценки влияния КДК на динамику атмосферы.

Исследование сигнала ОМД показало, что аппарат ЕОФ можно использовать для анализа набора метеорологических полей. Первые две ЕОФ позволили исследовать развитие ОМД вдоль экваториального пояса и установить, что чаще всего развитие нового события ОМД наблюдается сразу после завершения предыдущего цикла ОМД. Анализ амплитуды ОМД показал, что в зимнее время наблюдаются сильные осцилляции Маддена—Джулиана. Полученные оценки могут использоваться для исследования влияния ОМД на атмосферные процессы.

Исследование сигнала КДК выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-05-01050, влияние ОМД рассмотрено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 5.6493.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Багров Н. А. (1958). Аналитическое представление полей // Труды ЦИП. Вып. 64. С. 3—25.

Багров Н. А. (1959). Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды ЦИП. Вып. 74. С. 3—24.

Багров Н. А. (1960). Разложение метеорологических полей по естественным ортогональным составляющим // Труды ЦИП. Вып. 106. С. 133—138.

Доценко Н. М., Иващенко Н. Н., Сонечкин Д. М. (2011). Свойства естественных ортогональных составляющих температурных полей Северной Евразии в XX веке // Известия РАН. ФАО. Т. 47. Вып. 1. С. 35—47.

Кандиева К. К., Аникина О. Г., Погорельцев А. И. (2018). Влияние осцилляции Маддена—Джулиана на интенсивность и структуру полярного вихря // Ученые записки РГГМУ. Вып. 50. С. 18—27.

Лоренц Э. (1977). Физические основы теории климата и его моделирования. Предсказуемость климата. — Л.: Гидрометеиздат. С. 137—141.

Обухов А. М. (1960). О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Известия АН СССР. Серия геофизическая. Вып. 3. С. 432—439.

Ретинская Р. П., Бабич Я. Б. (1999). Аппроксимация рядами эмпирических ортогональных функций северополушарных полей облачности по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. Вып. 6. С. 8—15.

Юдин М. И. (1968). Физико-статистический метод долгосрочных прогнозов погоды. — Л.: Гидрометеиздат. 28 с.

Garfinkel C. I., Benedict J. J., Maloney E. D. (2014). Impact of the MJO on the boreal winter extratropical circulation // Geophys. Res. Lett. V. 41. P. 6055—6062. DOI: 10.1002/2014GL061094.

Kobayashi S., Harada Y., Ota Y. et al. (2015). The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics // J. Meteor. Soc. Japan. V. 93. P. 5—48.

Liu C., Tian B., Ki K.-F., Manney G. L., Livesey N. J., Yung Y. L., Waliser D. E. (2014). Northern Hemisphere mid-winter vortex-displacement and vortex-split stratospheric sudden warmings: Influence of the Madden—Julian Oscillation and Quasi—Biennial Oscillation // J. Geophys. Res. Atmos. V. 119. P. 12599—12620. DOI: 10.1002/2014JD021876.

Lorenz E. N. (1956). Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. Sci. Rep. № 1. Statistical Forecasting Project. M.I.T. Cambridge, Massachusetts. 48 p.

Scaife A. A., Athanassiadou M., Andrews M., Arribas A., Baldwin M., Dunstone N., Knight J., Maclachlan C., Manzini E., Müller W. A. (2014). Predictability of the quasi-biennial oscillation and its northern winter teleconnection on seasonal to decadal timescales // Geophys. Res. Lett. V. 41. № 5. P. 1752—1758.

Wheeler M., Hendon H. H. (2004). An all season real time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction // Mon. Weather Rev. V. 132. P. 1917—1932.

УДК 681.518:551.50:551.501

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГИС-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

К. Л. Восканян, А. Д. Кузнецов, О. В. Сероухова, Т. Е. Симакина

ФГБОУ ВПО Российский государственный гидрометеорологический
университет,

195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98

E-mail: serouhova@inbox.ru,
tatiana.simakina@gmail.com

Поступила в редакцию 30.10.2018

Поступила после доработки 28.11.2018

Введение

Известно, что в наземную метеорологическую наблюдательную сеть входят метеорологические станции и доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ). Причем измерительные системы, пройдя длительный путь своего формирования, в настоящее время бурно развиваются (Гаврилова и др., 2018; Луцько и др., 2018; Тарабукин, 2017). В планах на 2030 г. отмечается необходимость увеличения количества пунктов наземной наблюдательной сети до 5400 единиц, из которых 600 — автоматические метеорологические станции, а количество аэрологических станций планируется довести до минимально необходимого числа в 129 единиц (Распоряжение Правительства РФ, 2010). Вследствие этого индекс плотности пунктов наблюдений на территории России поднимется до значения 3,5, рекомендованного Всемирной метеорологической организацией (Распоряжение Правительства РФ, 2010). Создание на территории Российской Федерации единой оперативной сети наземных метеорологических (доплеровских) радиолокаторов и автоматических

грозопеленгаторов-дальномеров, объединение их информации с данными автоматических метеорологических станций позволит снизить вероятность ошибок прогноза опасных явлений погоды в 1,7 раз (Жуков и др., 2018; Восканян и др., 2016).

В связи с открытием новых наземных пунктов для проведения метеорологических наблюдений необходимо решить задачу оптимального размещения пунктов наблюдений на значительной территории (Крюкова и др., 2018). Площадки для размещения наземной автоматической метеорологической станций или ДМРЛ должны отвечать целому ряду специфических требований (Наставление, 1985; Бочарников и др., 2007). Оптимизировать поиск таких площадок позволяет использование современных геоинформационных технологий. ГИС-анализ территории ускоряет обследование обширных и труднодоступных областей, сокращает районы экспедиционных исследований, обеспечивает значительный экономический эффект за счет исключения проведения изысканий в местах, не отвечающих необходимым критериям (Сероухова, 2007; Симакина, 2004).

Целью настоящей работы явился поиск мест размещения наземных пунктов расположения метеорологических площадок и пунктов размещения ДМРЛ средствами ГИС с учетом специфики предъявляемых требований. Поиск состоял из трех этапов:

- создание базы пространственно-распределенных цифровых данных о характеристиках территории, на которой планируется размещение пунктов наблюдения;

- формирование серии специализированных карт участков, на которых соблюдаются отдельные требования, предъявляемые к месту расположения метеорологических пунктов;

- построение итоговой карты участков с одновременным соблюдением всех требований.

Возможности ГИС в решении поставленной задачи продемонстрированы на примере выбора участков для размещения метеоплощадки и ДМРЛ.

Требования к выбору позиции ДМРЛ и метеостанций

Площадка для установки ДМРЛ должна удовлетворять следующим требованиям (Бочарников и др., 2007):

- иметь размер не менее 50 м на 50 м;
- обеспечивать максимальный радиус действия ДМРЛ во всех направлениях кругового обзора за счет отсутствия в радиусе до 500 м от ДМРЛ высоких предметов (зданий, линий электропередач, железнодорожных насыпей и пр.), особенно в направлении наиболее частого вторжения атмосферных фронтов;
- для устранения помех от местных предметов по боковым лепесткам наилучшей позицией является возвышенная местность;
- исключить взаимные помехи от радиотехнических устройств, рабочие частоты которых близки к диапазону ДМРЛ;
- обеспечить соблюдение границ санитарно-защитной зоны;
- обеспечить максимум технических и эксплуатационных удобств (подъездных путей, наличие силового электропитания и др.).

Требования к выбору позиции репрезентативных метеорологических станций и постов включают:

- расположение станции в однородных физико-географических условиях (рельеф, подстилающая поверхность, увлажнение, состав почв и т. д.);
- защищенность метеоплощадки;
- соответствие подстилающей поверхности на метеоплощадке ландшафту окружающей местности (Наставление, 1985).

Методы ГИС для позиционирования пунктов метеорологических наблюдений

Современные ГИС располагают широким арсеналом базовых методов пространственного анализа, которые могут быть применены для решения задачи поиска участка, удовлетворяющего заданным требованиям. Исходной информацией для выполнения такой задачи являются пространственные данные о ландшафте местности, рельефе, данные генерального плана развития территории, цифровые схемы

различных объектов инфраструктуры, коммунальных сетей, и ряд других источников данных, реализованные в виде растровых слоев. Создание таких слоев базируется на спутниковых снимках, цифровой модели рельефа и др. В процессе обработки этой информации производятся следующие операции: классификация изображений, гистограммный анализ, пороговая сегментация, буферизация, морфометрический анализ, анализ близости, интерполяция, оверлейный анализ (Сероухова, 2007; Симакина, 2004).

Нахождение с помощью ГИС IDRISI территорий, потенциально пригодных для размещения метеорологической площадки и метеорологического радиолокатора

Для поиска потенциальных мест размещения метеостанций и ДМРЛ была создана база данных для района исследования, которая включала:

- спутниковый снимок рассматриваемой территории;
- топографическую карту;
- карту землепользования;
- карту рельефа;
- карту расположения водоемов и лесных массивов;
- карту расположения отдельных высотных препятствий.

Создание карты ландшафтов осуществлялось путем классификации спутникового снимка методом максимального правдоподобия. Фрагмент исходного снимка и результат его классификации представлены на рис. 1. Нахождение типичных участков выполнялось с помощью построения гистограммы значений яркости на ландшафтной карте исследуемой территории (см. рис. 1а). На гистограмме видно, что наиболее характерным типом ландшафта для данной территории являются водоемы, лесные массивы и жилые застройки, закодированные кодами 1, 3 и 4. На рис. 1г эти объекты представлены бинарным слоем.

Поскольку метеоплощадка должна располагаться на преобладающих формах рельефа, гистограммным методом были найдены такие формы по цифровой модели местности (рис. 2а). Три

пика на гистограмме соответствуют преобладающим высотам. Путем сегментации получена бинарная карта, отвечающая требованию преобладающих форм рельефа (рис. 2б).

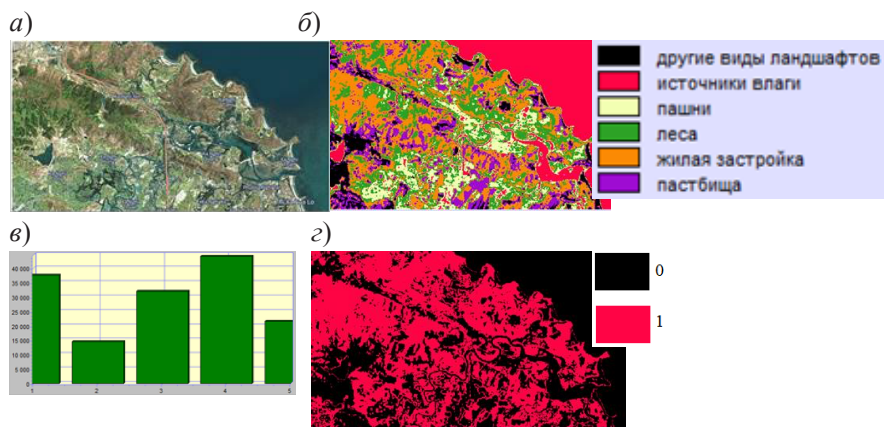


Рис. 1. Спутниковый снимок (а), карта ландшафтов (б), гистограмма карты ландшафтов (в) и участки, характерные для данной местности (з).

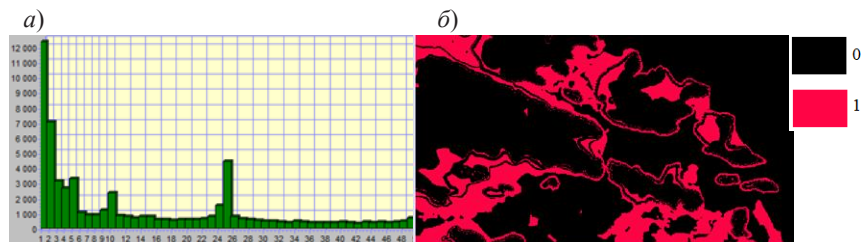


Рис. 2. Гистограмма карты рельефа (а) и зона преобладающих форм рельефа (б).

Следующее требование по расположению метеоплощадки — удаление от водоемов минимум на 100 м. Для выполнения этого требования сформирован слой, содержащий выделенные на карте ландшафтов водные объекты: море, реки и озера (рис. 3). На его

основе создан производный промежуточный слой, где яркость пиксела меняется от синего к красному в зависимости от расстояния до ближайшего водного объекта (см. рис. 3б). Эта операция позволила выделить буферную 100-метровую зону, подходящую для расположения метеоплощадки, она закодирована единицей и представлена на рис. 3в красным цветом. За пределами буферной зоны пикселы закодированы нулем — здесь строительство метеорологической площадки запрещается.

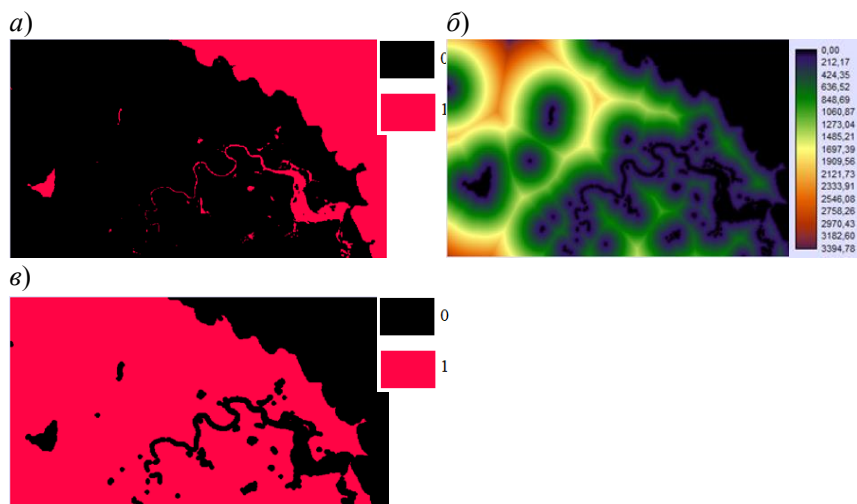


Рис. 3. Источники воды (а); карта удалений от источников воды (б); зона 100-метрового удаления от источников воды (в).

Метеоплощадка должна быть удалена от значительных по протяженности препятствий (лесов, промышленных зон, городской застройки и т. п.) на расстояние не меньше 20-кратной высоты этих препятствий. На имеющейся территории такими препятствиями являются зоны городской и промышленной застройки, а также лесная зона. Искомые зоны выделены из карты ландшафтов и представлены на рис. 4. Для этих участков была взята средняя высота в 15 м.

Следовательно, удаление от них составит расстояние 300 м. При определении нужных ячеек получен слой удалений от препятствий (рис. 4б) и на его основе сформирована 300-метровая буферная зона, в которой все ячейки были закодированы нулем. Строительство площадки в этой зоне противоречит требованиям. Таким образом, была получена карта с зоной удалений от значительных по протяженности препятствий, представленная на рис. 4в красным цветом.

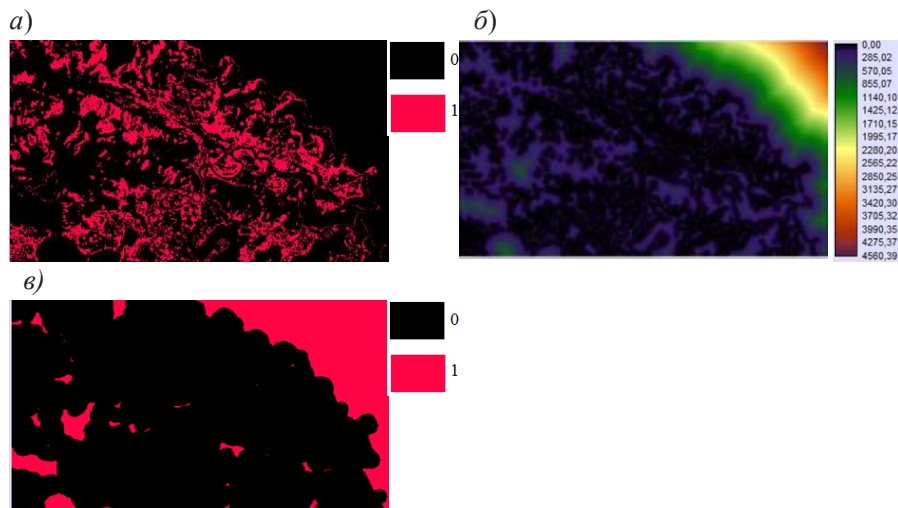


Рис. 4. Зона протяженных препятствий (а), карта удалений от лесов, городской и промышленной застройки (б), зоны удалений от значительных по протяженности препятствий (в).

Следующее требование — метеорологическая площадка должна быть удалена от невысоких отдельных препятствий (одноэтажных построек, отдельных деревьев и т. п.) на расстояние не менее 10-кратной высоты этих препятствий. Положение таких препятствий было установлено по спутниковому снимку сверхвысокого разрешения для данной территории. Далее строилась зона удалений

от точечных препятствий (рис. 5а). Была взята средняя высота препятствий 10 м и найдена зона радиусом 100 м от этих препятствий. Участки, подходящие для строительства метеоплощадки, закодированы единицей и представлены на рис. 5б.

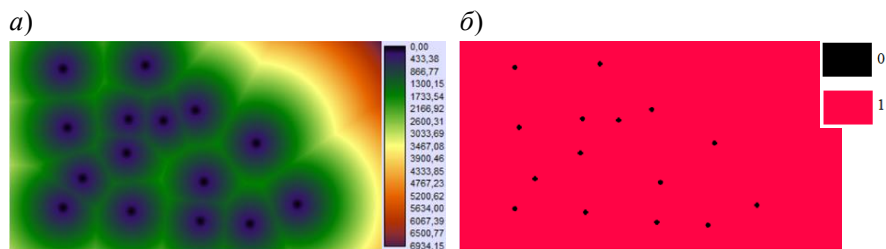


Рис. 5. Расстояния от отдельных препятствий (а) и удаления от невысоких отдельных препятствий (б).

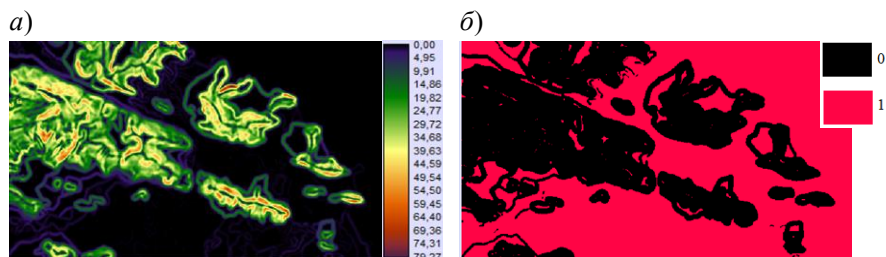


Рис. 6. Карта уклонов местности (а) и участков с уклоном местности менее 2% (б).

Метеорологическую площадку нельзя размещать вблизи глубоких оврагов, обрывов и других резких изломов рельефа. Учет этого требования потребовал построения карты уклонов местности, где градусная мера указывает на степень повышения или понижения поверхности в данной ячейке (рис. 6а). Для определения наиболее пологих и ровных участков рельефа выделена зона с уклоном менее 2 % (рис. 6б).

После построения карт участков, на которых соблюдались отдельные требования к размещению метеоплощадки, необходимо было получить карту участков, на которых соблюдались бы все требования. Это было сделано с помощью процедуры умножения бинарных слоев, результат которой демонстрирует рис. 7. На этой карте красным цветом показаны зоны, пригодные для строительства метеоплощадки, они наложены на спутниковый снимок и представлены в трехмерном виде. Вычисленная площадь найденных участков и сопоставление ее с требуемым размером метеоплощадки 26х26 м позволяют разместить на рассматриваемой территории как минимум 99 метеоплощадок.

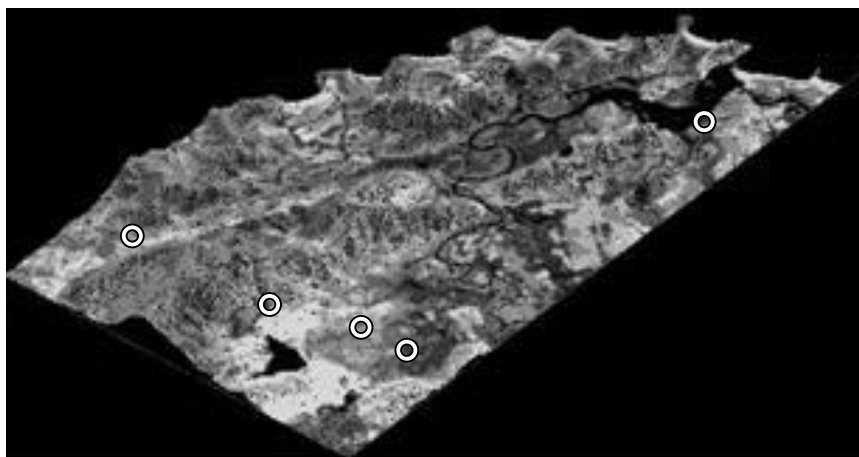


Рис. 7. Участки для строительства метеоплощадки (обозначены кружками) на фоне спутникового снимка.

Выбор позиции установки ДМРЛ с помощью ГИС

Карта изучаемой территории, где был осуществлен поиск мест для размещения метеорологических радиолокаторов, представлена на рис. 8. Требовалась следующая информация об этой территории, представленная растровыми слоями: размещение населенных пунктов,

объектов промышленной инфраструктуры, железных и автомобильных дорог, водных объектов, ландшафт и топография (Автоматизированный метеорологический комплекс «Метеор-Метеоячейка», 2009).

Первое из рассматриваемых требований к месту расположения МРЛ – размещение локатора на возвышенной местности. Использование цифровой модели рельефа рассматриваемого региона позволяет выделять области, удовлетворяющие такому критерию.

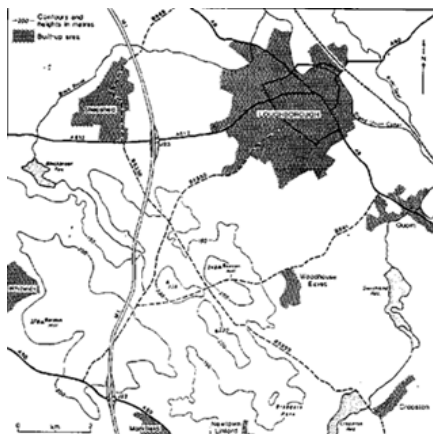


Рис. 8. Географическая карта исследуемого района.

Следующее требование касается удаления МРЛ от высоких местных предметов в радиусе не менее 500 м от выбираемой позиции. На рис. 9а черным цветом выделены области, удовлетворяющие указанному критерию относительно жилых зданий. Аналогичным образом была получена карта зон удалений от линий электропередач, представленная на рис. 9б. Зоны, подходящие для расположения МРЛ, представлены черным цветом. Области, выделенные белым цветом, непригодны для размещения МРЛ. Затем путем умножения бинарных слоев была получена зона удаления от всех высоких предметов на 500 м, представленная на рис. 9в черным цветом.

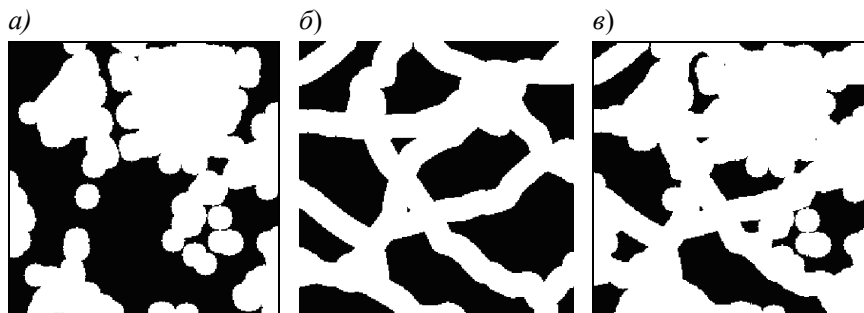


Рис. 9. Зона шириной 500 м от жилых застроек (а), зона шириной 500 м от линий электропередач (б) и результирующая зона удаления от высоких местных предметов на 500 м (в).

Следующий этап заключался в определении зоны, исключающей возникновение взаимных помех от радиотехнических устройств, несущие частоты которых близки к диапазону излучения МРЛ. После выявления мест расположения таких устройств на рассматриваемой территории и с учетом минимально допустимого расстояния между позицией МРЛ и радиотехническими объектами (500—600 м) была построена зона возможного расположения позиции МРЛ, которая на рис. 10а выделена черным цветом.

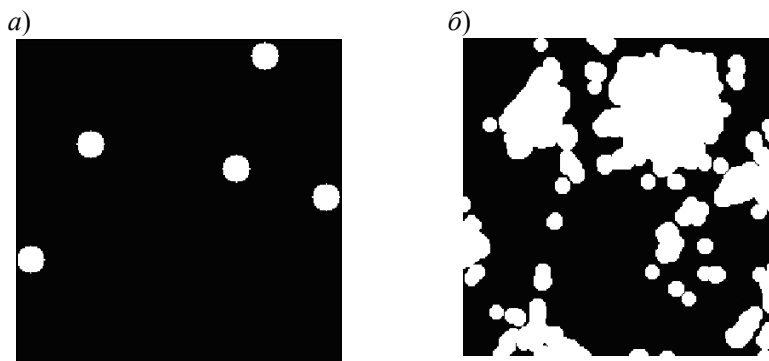


Рис. 10. Зона радиусом 500 м от расположения радиотехнических устройств (а) и санитарно-защитные зоны (б).

Отметим, что вопрос об электромагнитной совместимости, как правило, приходится решать одновременно с вопросами по минимизации стоимости на прокладку коммуникаций и выбору позиции с минимальными углами закрытия.

В целях обеспечения санитарных норм и соблюдения правил защиты населения от электромагнитных полей, создаваемых МРЛ, выбор позиции для локатора следует производить в соответствии с действующими санитарными нормами и методическими указаниями по определению электромагнитной обстановки в местах размещения МРЛ. Санитарно-защитной зоной (СЗЗ) является площадь, примыкающая к технической территории МРЛ. Внешняя граница СЗЗ МРЛ определяется на высоте до 2 м от поверхности земли по предельно допустимому уровню потока энергии (ПДУ). Размер санитарно-защитной зоны определяется релеевским расстоянием, определяемым границей дальней зоны R_p от источника излучения, где формируется диаграмма направленности антенны МРЛ (Автоматизированный метеорологический комплекс «Метеор-Метеоячейка», 2009; Контроль и нормализация электромагнитной обстановки, 1990). Зоной ограничения застройки (ЗОЗ) является территория, где на высоте более 2-х метров от поверхности земли ПДУ превышает 10 мкВт/см^2 .

Для расчета СЗЗ и зоны ограниченной застройки были использованы следующие характеристики передатчика МРЛ:

- импульсная мощность 250 кВт,
- несущая частота 5640 МГц,
- длина волны 5,32 см,
- частота посылок в режиме Z 250Гц,
- длительность зондирующего импульса в режиме Z $2 \cdot 10^6$.

Для расчета СЗЗ также использованы следующие характеристики антенной системы МРЛ:

- коэффициент усиления 45Дб,
- ширина диаграммы направленности антенны θ $0,95^\circ$,
- диаметр антенны 4,2 м,
- коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта с РПУ на передачу 1,5 дБ,

— уровень первого бокового лепестка по отношению к главному 30 дБ.

При использовании приведенных характеристик размер СЗЗ составил 130 м.

Размер зоны ограниченной застройки R_{max} для $P_u = 250 \cdot 10^3$; $F = 250$ Гц; $t_3 = 2$ мкс; $k_{пер} = 0,715$; $G = 3,2 \cdot 10^4$; $\Phi_3 = 1,6$; ПДУ=10 мкВт/см² составил 1170 м.

На основе полученных оценок для ЗОЗ и СЗЗ на рис. 10(б) черным цветом выделен район возможного размещения МРЛ с учетом границ санитарно-защитной зоны.

Еще одно требование связано с необходимостью удаления позиции МРЛ от взлетно-посадочных полос аэродромов, имеющих в регионе, которое должно составлять не менее 130 м. Положение такой запрещенной для позиции МРЛ зоны представлено на рис. 11а белым цветом. Кроме этого выбранная позиция должна учитывать перспективные планы развития региона. Важной является информация о новых застройках (жилых массивов, стадионов, промышленных предприятий и т. п.) и, соответственно, изменении радиуса санитарно-защитных зон.

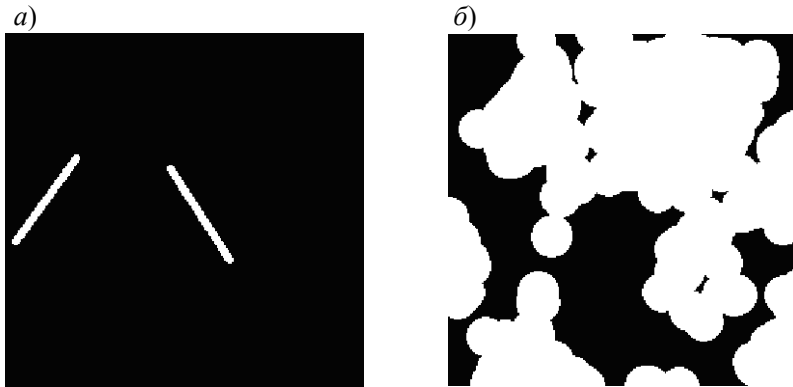


Рис. 11. Положение зон взлетно-посадочных полос (а) и санитарно-защитных зон (выделены белым цветом) с учетом плана перспективной застройки региона (б).

На рис. 11б представлены черным цветом возможные зоны размещения МРЛ с учетом развития района на 10 лет.

Для облегчения процесса монтажа и технического обслуживания ДМРЛ необходимо обеспечить максимум технических и эксплуатационных удобств в месте расположения радиолокационной станции, в том числе и подъездные пути (бытовые условия для обслуживающего персонала в месте расположения ДМРЛ не предусматриваются — в оперативном режиме ДМРЛ работает в автоматическом режиме). На рис. 12а представлена карта распределения электрической, оптоволоконной и телефонной сети данного района. На ее основе выделены области, благоприятные для выбора позиции с точки зрения удобства подводки силового электропитания, возможности подключения к оптоволоконной или другой сети для обеспечения передачи оперативной информации от ДМРЛ, пожарной сигнализации и др. Такие области показаны черным цветом на рис. 12б.

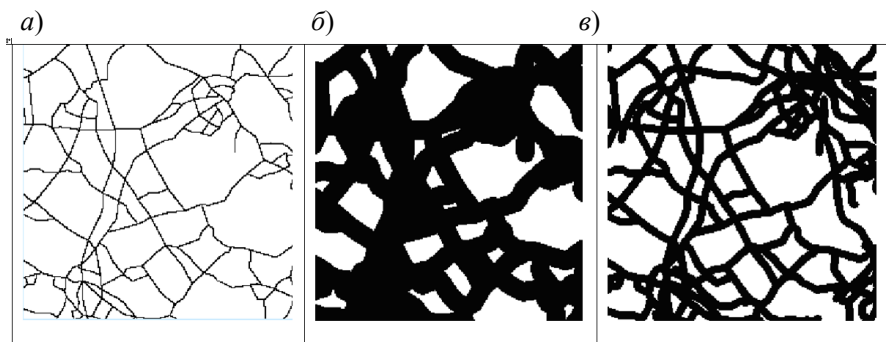


Рис. 12. Расположение электрической, оптоволоконной и телефонной сетей (а), перспективные зоны положения площадок для установки ДМРЛ с учетом оптимального подключения (б), оптимальные зоны расположения позиций ДМРЛ относительно подъездных путей (в).

На основе карты транспортной сети региона сформирован слой, представленный на рис. 12в, где черным цветом выделены зоны,

расположенные в 150 м от подъездных путей, т. е. наиболее благоприятные с точки зрения удобства транспортного обслуживания.

Итоговая карта участков, удовлетворяющая всем рассмотренным требованиям по установке ДМРЛ, должна быть получена путем наложения сформированных ранее слоев, на которых соблюдались отдельные требования. Результат операций наложения представлен на рис. 13.

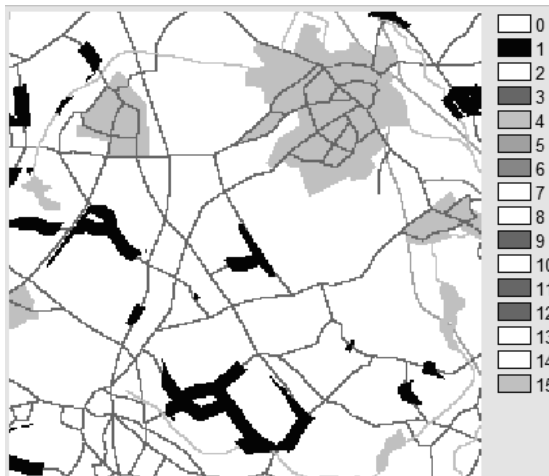


Рис. 13. Участки (выделены черным цветом), подходящие для расположения ДМРЛ на фоне карты местности.

Заключение

В статье рассмотрены возможности ГИС-технологий для поиска потенциально пригодных мест размещения наземных метеорологических измерительных систем с учетом различий в требованиях к характеристикам таких пунктов для метеорологических площадок и пунктов установки ДМРЛ. Показан процесс поэтапного учета требований к наземным пунктам. На основе проведенного исследования можно констатировать, что предварительный поиск пунктов, потенциально пригодных для размещения наземных

метеорологических измерительных систем, отвечающий различным требованиям, может быть выполнен с помощью геоинформационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматизированный метеорологический комплекс «Метеор-Метеоячейка». Инструкция по проведению работ при выборе позиции для размещения АМРК. Методические рекомендации (2009). — М.: Метеоагентство Росгидромета. 28 с.

Бочарников Н. В., Брылев Г. Б., Кузнецова Л. И., Линева А. Г., Лялюшкин А. С., Оленев В. А., Паркин Т. В., Солонин А. С., Устинов В. К., Фролов В. И., Четверикова Е. С., Якимайнен Н. А. (2007). Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы (АМРК) «Метеоячейка» // СПб: Гидрометеиздат. 246 с.

Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С. (2016) Автоматические метеорологические станции. Часть 1. Тактико-технические характеристики. Учебное пособие. — СПб: Изд-во РГГМУ. 195 с.

Гаврилова С. Ю., Иванова Т. А., Луцко Л. В., Ерохина А. Е., Махоткин А. Н., Коломеец Л. И., Садыкова А. Ф. (2018). О состоянии и функционировании автоматизированных метеорологической и актинометрической сетей в 2017 году // Труды ГГО. Вып. 588. С. 86—109.

Жуков В.Ю., Кузнецов А.Д., Сероухова О. С. (2018) Интерпретация данных доплеровских метеорологических радиолокаторов. — СПб: Изд-во РГГМУ. 119 с.

Контроль и нормализация электромагнитной обстановки, создаваемой метеорологическими радиолокаторами. (1990). — Л.: Гидрометеиздат. 64 с.

Крюкова С. В., Кузнецов А. Д., Симакина Т. Е. (2018). Оптимизация сети станций экологического контроля в Санкт-Петербурге // Материалы Международной научно-практической конференции «Гетерогенные системы и процессы в природных и техногенных средах. Атмосферная экология». СПб, 28—29 ноября 2017. Часть 3. — СПб. С. 37—47.

Луцко Л. В., Ерохина А. Е., А. П. Бычкова, Махоткина Е. Л. Махоткин А. Н., Бекенева О. Б. (2018) Актинометрическая сеть Росгидромета: текущее состояние // Труды ГГО. Вып. 589. С. 125—152.

Сероухова О. С. (2007). Геоинформационные системы. — СПб: Изд-во РГГМУ. 116 с.

Симакина Т. Е. (2004). Цифровая обработка спутниковых снимков с помощью ГИС IDRISI. — СПб: Изд-во РГГМУ. 58 с.

Тарабукин И. А. (2017). Радиометеорологические исследования в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова // Труды ГГО. Вып. 585. С. 212—260.

Распоряжение Правительства РФ от 03.09.2010 № 1458-р. Стратегию деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата). (<http://www.zakonprost.ru/content/base/162790>).

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, выпуск 3, часть 1. Метеорологические наблюдения на станциях (1985). — Л.: Гидрометеоиздат. 214 с.

УДК 551.377

РИСКИ УГРОЗ ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЖАРЫ НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ

И. О. Лучицкая, Н. И. Белая

Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт
630099, Новосибирск, Советская, 30
E-mail: belaya@sibnigmi.ru

Поступила в редакцию 20.11.2018

Поступила после доработки 20.12.2018

Введение

К настоящему времени благодаря инициативам мирового сообщества накоплен опыт в решении проблем адаптации населения и экономики к изменению и изменчивости климата с целью снижения рисков бедствий, укрепления устойчивого развития стран и регионов (Катцов, Порфирьев, 2011; Второй Оценочный доклад..., 2014; Дорожная карта..., 2016). Волны жары относятся к группе наиболее опасных природных явлений значительного воздействия, создающих риск для жизни и здоровья населения, уничтожения имущества, экологических потрясений, а также эпидемиологических угроз (План действий..., 2011; Атлас здоровья..., 2012; Доклад о климатических рисках..., 2017).

Одной из ключевых задач стратегии социально-экономического развития Российской Федерации является увеличение продолжительности жизни и улучшение качества медицинской помощи людям старшего поколения. В этой связи следует уделить должное внимание проблеме защиты здоровья данной уязвимой категории населения от воздействия погодных аномалий.

Последствия воздействия тепловых волн летом 2010 года в Европейской части России привели к значительным людским потерям (Ревич, 2011). Это активизировало исследования ареала распространения жары на территории Российской Федерации в комплексе с оценкой смертности населения различных регионов от этого явления (Булыгина и др., 2012; Ревич, Шапошников, 2012).

В Западной Сибири аномально жарким было лето 2012 г., когда волны жары распространялись над значительными территориями и были продолжительными по времени.

В задачу настоящей работы входила оценка риска нанесения вреда здоровью пожилого населения (65 лет и старше), создаваемого волнами жары в южных районах Западной Сибири, и определение адаптационных мер в сфере здравоохранения и гидрометеорологического обслуживания.

Методика исследования и исходные данные

При анализе использовалась методология оценки погодноклиматических рисков для технических целей, изложенная в монографии Н. В. Кобышевой (Кобышева, Акентьева и др., 2015). На первом этапе исследований эти базовые методические подходы могут быть применены для решения задач медико-социальной направленности. Рассматриваемый регион представлен пятью субъектами Российской Федерации: Новосибирская, Томская, Кемеровская области, Алтайский край и Республика Алтай. Информационную основу исследования составили данные 124 станций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» за период 1985—2014 гг.

В ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» создана база данных, содержащая климатические характеристики волн жары: повторяемость, продолжительность, интенсивность, а также специальные параметры, используемые в эмпирической модели расчета рисков для территорий субъектов — частота явления и площадь его распространения.

Обоснование критерия опасности волн жары

Волной жары принято называть период от суток и более с аномально высокой температурой воздуха (среднесуточной, максимальной или минимальной (ночной)). В исследованиях по оценке последствий от воздействия экстремальных тепловых стрессов пороговые уровни температуры определяются индивидуально для каждого региона по вероятностным характеристикам заданной обеспеченности, отклонениям от климатической нормы, экстремальным величинам, превышающими установленные пределы (Шапошников, Ревич, 2018). В эмпирических моделях для такой оценки используется эффективная температура. Для юго-востока Западной Сибири была проанализирована информативность таких специализированных критериев, характеризующих явление жары, как:

«*Индекс жары НИ*» — биоклиматический показатель для оценки совместного воздействия на организм воздействия температуры и влажности воздуха (Руководство..., 2008);

Критерий EuroHEAT — показатель, характеризующий необычайно высокие тепловые нагрузки при сочетании максимума эффективной температуры и максимума суточного минимума (90-процентной обеспеченности) с сохранением таких условий не менее 2 дней (План действий..., 2011).

Установлено, что на юго-востоке Западной Сибири состояние погоды, относящееся по индексу жары НИ к категории «осторожность» (температура воздуха 27—32°C), наблюдается 6—13 раз за летний сезон, а к категории «экстремальная осторожность» (температура 32—41°C) только 1—2 раза. В первом случае неблагоприятные погодные условия приводят к повышенной утомляемости, во втором от перегрева возможны солнечные удары и другие расстройства здоровья.

Индекс жары НИ, определяющий категорию «опасность» (температура воздуха 42—54°C), отмечается 1 раз в 30 лет в Алтайском крае, а «экстремальная опасность» (температура выше 54°C) на территории области не наблюдается.

Условия, соответствующие критерию EuroHEAT «аномальная жара», зафиксированы лишь двумя станциями Томской области: Новый Васюган в 1998 г. и Средний Васюган в 2012 г. На остальной территории за весь рассмотренный период температурные условия, соответствующие критерию не наблюдались.

В ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» в перечень опасных явлений (ОЯ) включены «аномально жаркая погода» — период с максимальной температурой 30°C и выше в течение 5 и более дней и «сильная жара» — период с максимальной температурой 35 °C и выше не менее 3 дней (Положение..., 2014). Очевидно, оба явления представляют волны жары. Периоды сильной жары практически полностью входят в периоды аномально жаркой погоды.

Информацию о подверженности региона крайним условиям теплового дискомфорта дает рис. 1, на котором представлено число волн жары, возможное 1 раз в 50 лет.



Рис.1 Число случаев аномальной жары, возможное 1 раз в 50 лет.
Номера районов соответствуют числу ОЯ.

Установлено, что на юго-западе региона за лето возможны 3—5, в центральной и юго-восточной — 2, в северной — не более одного случая аномально жаркой погоды.

На вершинах и открытых склонах гор Алтая волны жары не формируются.

Тенденции изменения и изменчивости частоты волн жары

Увеличение частоты и интенсивности волн жары на территории России дает основание ожидать дальнейший рост рисков опасных проявлений термического режима с негативными последствиями для здоровья людей (Доклад о климатических рисках..., 2017).

На юго-востоке Западной Сибири достаточно наглядно проявляется увеличение числа случаев такого ОЯ, как «аномально жаркая погода» в период с 1985 по 1998 гг., и уменьшение его в период 1999—2014 гг. (исключение — жаркое лето 2012 года) (см. рис. 2). В целом за период частота ОЯ слабо увеличивается, но эта тенденция статистически незначима ($R^2 = 0,016$).

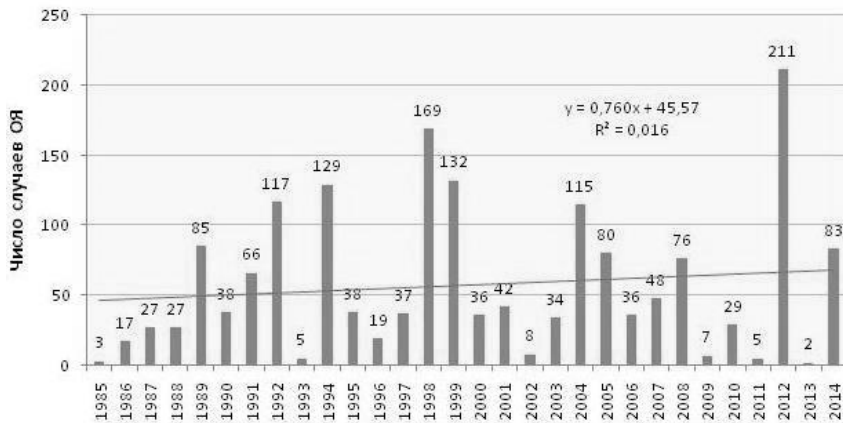


Рис. 2. Число случаев ОЯ «аномально жаркая погода» по данным Западно-Сибирского УГМС.

Выявление частоты появления периодов аномально жаркой погоды выполнено с использованием метода оценки по трендам положительных и отрицательных отклонений (Шерстюков, 2011). О наличии тенденции можно судить лишь в случае различий в величине коэффициентов линейных трендов положительных (a_p) и модуля отрицательных (a_n) отклонений. Для оценки достоверности тренда используется выражение:

$$|a_p - a_n| > \frac{\sqrt{D_p + D_n}}{f} \quad (1)$$

где $a_p - a_n$ — разность коэффициентов линейного уравнения; D_p и D_n — дисперсия отклонений; f — количество лет.

Как показали расчеты (табл. 1), коэффициенты тренда обоих знаков положительные, а скорость изменения модуля отрицательных отклонений (a_n) больше величины отклонений положительных (a_p), что, вероятно, обусловлено преобладанием прохладных летних сезонов в новом тысячелетии по отношению к предыдущему периоду.

Таблица 1

Характеристики трендов и оценка изменчивости частоты волн жары

a_p	a_n	$ a_p - a_n $	D_p	D_n	$\sqrt{D_p + D_n}$
0,71	1,34	0,63	1896	287	1,56

Итоговые оценки достоверности тренда согласно условиям неравенства (1) свидетельствуют об отсутствии тенденции в изменении от года к году частоты волн жары в регионе юго-востока Западной Сибири.

Оценка социального риска для уязвимой группы населения

Риск угроз здоровью социальной группы (пожилые люди), создаваемый волнами жары, рассчитан на базе составляющих риска:

вероятности опасного явления и уязвимости реципиента в условиях сложившейся экстремальной погодной ситуации:

$$R = p \cdot \frac{s}{S} \cdot k, \quad (2)$$

где p — вероятность числа лет с волнами жары, $p = n/N$, где n — число лет с явлением, N — период наблюдений,
 s — средняя площадь, занимаемая ОЯ, км²,
 S — площадь территории субъекта, км²,
 k — доля населения в возрасте 65 лет и старше (по данным Росстата).

Социальный риск, выраженный в численности пожилых людей, определяется как:

$$R_{\text{соц}} = R \cdot M, \quad (3)$$

где M — общая численность населения в субъекте.

Для расчета социального риска в муниципальных образованиях (МО) формула имеет вид:

$$R_{\text{мо}} = R_{\text{соц}} \cdot \frac{s'}{S} \cdot \frac{z}{Z}. \quad (4)$$

Здесь s' — площадь МО;

z — плотность населения МО;

Z — плотность населения субъекта.

Согласно мировой статистике население страны (региона) считается стареющим, если доля пожилых людей превышает 7 %. На территории исследуемых субъектов данный показатель (k) колеблется в пределах 9—14 % (табл. 2). Волны жары отмечаются достаточно часто: примерно в 6—8 годах из десяти, в Алтайском крае — практически ежегодно. Средняя площадь охвата достигает 40—50 % территории.

Наибольший социальный риск характерен для Алтайского края, наименьший — для Томской области, что связано с наличием значительных необжитых территорий.

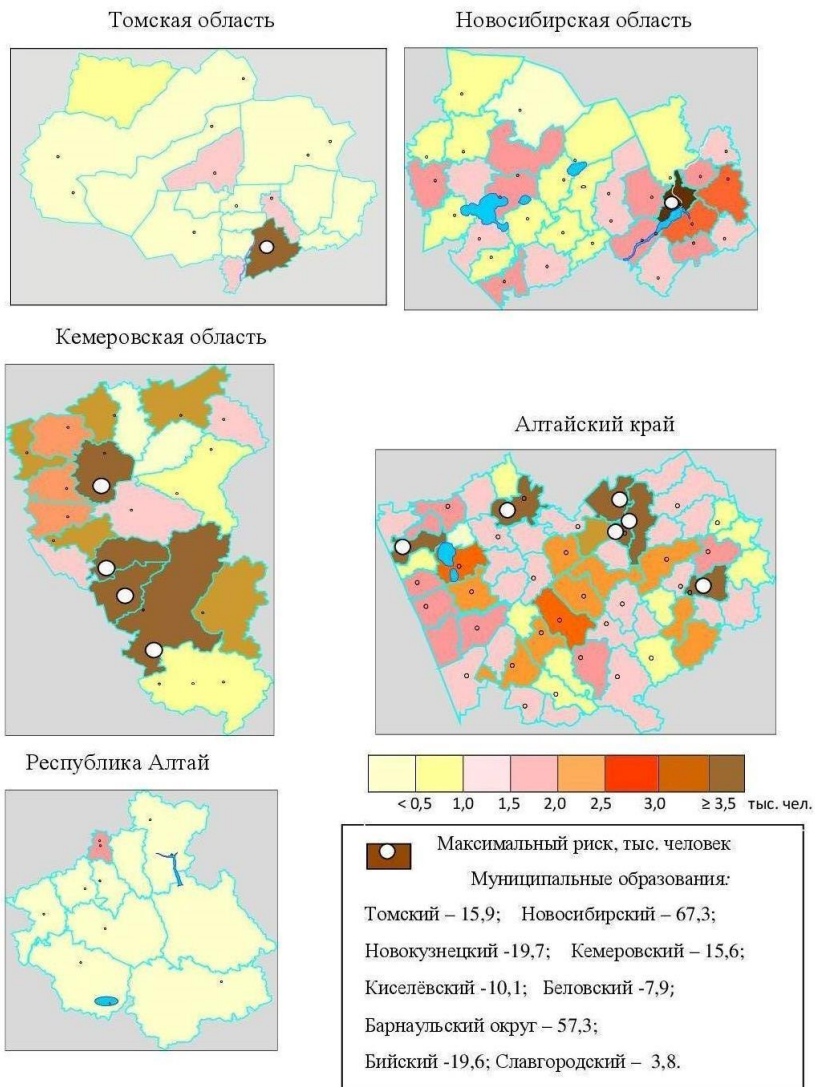


Рис. 3 Социальный риск (тыс. чел.), создаваемый anomalно жаркой погодой для населения в возрасте 65 лет и старше.

Оценки социального риска для отдельных муниципальных образований представлены на рис. 3. Максимальная социальная нагрузка приходится на муниципальные образования крупных городов, в Кемеровской области — на обширные районы промышленных центров. Высокий уровень опасности создается в Алтайском крае.

В Томской области на неосвоенных территориях правобережья реки Оби социальный риск незначителен, аналогичная ситуация характерна для Горного Алтая.

Таблица 2

Оценки риска угроз здоровью населения в возрасте от 65 лет и старше от воздействия волн жары

Субъект РФ	p	$\frac{s}{S}$	к	R	Rсоц. тыс. чел
Томская область	0,67	0,35	0,10	0,023	24,2
Новосибирская область	0,77	0,41	0,13	0,041	112,1
Кемеровская область	0,60	0,43	0,12	0,026	86,7
Алтайский край	0,93	0,54	0,14	0,070	180,0
Республика Алтай	0,53	0,22	0,09	0,010	2,2

Оценить экономический риск в данном случае невозможно из-за отсутствия специализированных данных.

Анализ медицинских данных по заболеваемости

В работе использованы статистические данные Минздрава Новосибирской области (табл. 3), а также данные «Описаний опасного метеорологического явления» на территории Западно-Сибирского УГМС (РД) за период 2009—2014 гг., в которых содержатся даты начала и конца явления, его длительность и интенсивность, а также данные медицинской статистики (рис. 4).

Рассматриваемые годы существенно различаются по термическому режиму: в 2012 году лето было необычайно жарким,

в 2013 г. температура выше 30°C практически не поднималась и, наконец, 2014 г. лето был умеренно жарким. При этом количество обращений за неотложной медицинской помощью изменялось незначительно.

Таблица 3

Данные по вызовам скорой медицинской помощи на территории Новосибирской области

Год	Количество			Стоимость вызова скорой помощи ²
	вызовов скорой помощи ¹	госпитализации	летальных исходов	
2012	2219	477	0	1749,5
2013	2068	402	0	1754,6
2014	2213	732	0	1750,3

Примечание:

¹ — тепловые и солнечные удары, другие воздействия.

² — подушевое финансирование, руб.

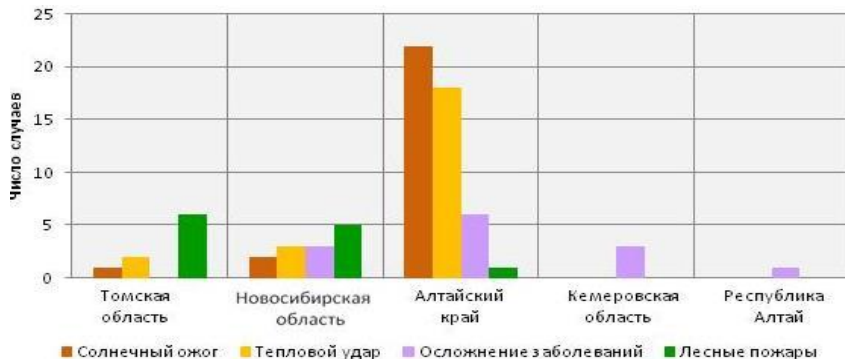


Рис. 4. Повторяемость различных категорий нарушения здоровья от воздействия anomalно жаркой погоды и лесных пожаров.

Под отметкой «Осложнение заболеваний» понимается обострение сердечно-сосудистых заболеваний;

под отметкой «Лесные пожары» — обострение заболеваний органов дыхания.

Предложения по адаптации последствий воздействия волн жары для здоровья населения

Министерство здравоохранения и социального развития 18 апреля 2012 г. направило в субъекты Российской Федерации «План действий по защите здоровья населения от воздействия аномальной жары» (ПДЗ). Необходимость разработки соответствующих местных планов была обоснована ростом повторяемости волн жары, усилением их интенсивности и увеличением смертности в условиях теплового стресса. Ряд субъектов (Карельская автономная республика, Архангельская область, Татарстан) достаточно оперативно выполнили данное требование.

Как показывают исследования, последствия волн жары на территории Западной Сибири оказываются не столь катастрофичными, как на территории ЕТР. Однако анализ негативных проявлений экстремально жаркого лета 2012 года показал, что в Алтайском крае, Новосибирской и Кемеровской областях и в центральных муниципальных образованиях Томской области и Республики Алтай риск угроз здоровью населения может быть значительным.

Эколого-экономические особенности юго-восточных районов Западной Сибири позволили выделить дополнительные группы риска, подверженные тепловым стрессам в периоды жаркой погоды (табл. 4).

Таблица 4

Экспертные группы риска

Группы риска	Субъекты
Садоводы-любители	Все субъекты
Туристы; лица, пребывающие для санаторно-курортного лечения	Алтайский край, Республика Алтай
Работники сельского хозяйства, работающие на открытом воздухе	Новосибирская область, Алтайский край
Население в очагах задымления от лесных пожаров	Томская область

Негативные погодные условия могут по-разному проявляться в отдельных районах на территории Западной Сибири.

Томская область. Численность населения 1058 тыс. чел., однако преобладающая часть населения сосредоточена на юге территории (Томский, Северский районы). В Томске проживает половина всего населения. Основную угрозу создают волны жары. Повышенная влажность воздуха (лесная зона, болота), а также задымление от лесных пожаров усугубляют негативные воздействия перегрева (Панченко, Дюкарев, 2010). Объектом особого внимания должны быть лица с хроническими заболеваниями сердечно-сосудистой системы и органов дыхания.

Новосибирская область. Численность населения 2747 тыс. чел. Около 50 % населения составляют жители Новосибирска, каждый пятый житель которого имеет дачный участок в пригородных районах. Основные угрозы создают волны жары (с периодичностью раз в 2 года). В данном регионе актуальной является проблема снижения последствий воздействия жары на здоровье садоводов-любителей.

В северных и восточных районах дополнительным источником неблагоприятных условий являются дымы от лесных пожаров, происходящих в Томской области (Панченко, Дюкарев, 2010).

Кемеровская область. Численность населения этого крупнейшего центра угольно-добывающей отрасли России (Кузбасса) составляет 2717 тыс. чел. Промышленные центры — Кемерово и Новокузнецк, фактором риска в которых является высокий уровень плотности населения. Волны жары наблюдается раз в 2—3 года. В регионе должны проводиться стандартные регламентные мероприятия по защите здоровья от воздействия волн жары.

Алтайский край — южный регион Западной Сибири. Численность населения 2377 тыс. чел. Аномальная жара наблюдается практически ежегодно. В субъекте зафиксировано максимальное число жителей, получивших солнечные ожоги и тепловые удары (рис. 4). Это обстоятельство должно стать поводом разъяснительной работы о последствиях от перегрева.

Для работников сельскохозяйственного производства требуется выполнение нормативов пребывания на открытом воздухе при высоких температурах.

Республика Алтай. Численность населения 218 тыс. чел. Населенные пункты расположены в основном в долинах рек. Алтайский регион является одним из лидеров по созданию туристско-рекреационных кластеров с ежегодным потоком до 2 млн человек. При этом ожидается, что в дальнейшем поток туристов будет только возрастать особенно в летний период. Одним из самых перспективных мест внутреннего и внешнего туризма является плато Укок, среди посетителей которого заметную долю составляют люди пожилого возраста. В высокогорных районах ОЯ не наблюдается, однако на значительных территориях республики возможно негативное воздействие волн жары.

С учетом особенностей Западно-Сибирского региона для эффективной защиты здоровья пожилых людей в состав первоочередных адаптационных мер следует включить:

- совершенствование системы прогнозирования ОЯ «аномально жаркая погода» и «сильная жара»;
- заблаговременное оповещение населения о возможных неблагоприятных последствиях волн жары;
- обеспечение медицинской помощи и доступных консультаций, в том числе в туристических регионах;
- накопление информации о возможных климатических, изменениях для корректировки управленческих планов.

Заключение

В настоящей статье впервые для Западной Сибири обобщены результаты оценки риска угроз для здоровья уязвимой категории населения — в возрасте от 65 лет и старше, создаваемых волнами жары.

Расчет социального риска по муниципальным образованиям выполнен с учетом отношения плотности населения в МО к плотности населения в субъекте.

Представлено видение адаптационных мер по минимизации неблагоприятных последствий.

В дальнейшем необходимо расширить взаимодействие с органами здравоохранения, социальными службами, Сибирским отделением РАН с целью получения информации и выполнения обоснованной оценки экономического риска угроз здоровью уязвимого контингента населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас здоровья и климата. (2012). ВОЗ, ВМО. — Женева: ВМО. 68 с.
- Булгына О. Н., Кориунова Н. Н., Разуваев В. Н.* (2012). Температурный режим на территории России летом 2010 года. //Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып. 176. С. 13—22.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. (2014) — М.: Росгидромет. 59 с.
- Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Под редакцией д-ра физико-математических наук В.М.Катцова. (2017). — СПб: ФГБУ «ГГО». 166 с.
- Дорожная карта Всемирной метеорологической организации. Проект версии 1.3. (2016). — Женева: ВМО. 43 с.
- Катцов В. М., Порфирьев. Б. Н.* (2011). Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу (резюме доклада) // Труды ГГО, Вып. 563. С. 7—59.
- Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П.* (2016). Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. — СПб: «Кириллица» 215 с.
- Панченко Е. М., Дюкарев А. Г.* (2010). Оценка предрасположенности Обь-Томского междуречья к возникновению пожаров // В сб.: Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2010»: Материалы VII Всероссийский симпозиума. — Томск: Аграф-Пресс. С. 334—336.
- План действий по защите здоровья населения от воздействия аномальной жары. Руководство. (2011). — Копенгаген: Европейское бюро ВОЗ. 50 с.
- План действий по защите здоровья населения от воздействия аномальной жары. Руководство (2012). — М.: Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации. 48 с.
- Положение о порядке действий оперативно-прогностических подразделения ФГБУ «Западно-Сибирского УГМС» при угрозе возникновении и возникновении

опасных природных (гидрометеорологических и гелиогеофизических) явлений. (2014) — Новосибирск: ФГБУ «Зап.-Сибирское УГМС». 31 с.

Ревич Б. А. (2011). Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения Европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки // Экология человека. № 7. С. 3—9.

Ревич Б. А., Шапошников Д. А. (2012). Изменение климата, волны жары и холода как факторы риска повышенной смертности населения в некоторых регионах России // Проблемы прогнозирования. № 2. С. 122—138.

Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики (2008) / Под редакцией д-ра геогр. наук Н. В. Кобышевой.. — СПб: ООО «Астерион». 336 с.

Шапошников Д. А., Ревич Б. А. (2018). О некоторых подходах к вычислению рисков температурных волн для здоровья.// Анализ рисков здоровья. № 1. С. 22—31.

Шерстюков Б. Г. (2011). Изменения, изменчивость и колебания климата. — Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 291 с.

ИОНОСФЕРНОЕ ГИДИРОВАНИЕ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН

Ю. К. Калинин, Ю. А. Репин, Е. Н. Хотенко, А. В. Щелкалин

Институт прикладной геофизики
имени академика Е. К. Федорова
129128 Москва, ул. Ростокинская, 9
E-mail: kalinplat@rambler.ru
director@ipg.geospace.r
khotenko@ipg.geospace.ru
ipg-conf@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.11.2018
Поступила после доработки 10.12.2018

Введение

Геофизический объект ионосфера — область газовой оболочки Земли, содержащая свободные заряды — может оказывать существенное воздействие на появляющиеся в ней антропогенные объекты, такие как макротела и взаимодействующие с зарядами среды вещества, а также электромагнитные волны. Квазисферическая структура ионосферы является фактором, обуславливающим удержание ниже главного максимума ионизации радиоволн, излучаемых наземным источником. Именно это геофизическое явление названо нами ионосферным гидированием радиоволн. В данной статье будет рассматриваться только гидирование радиоволн декаметрового диапазона. Для расстояний по земной поверхности между источником и точкой наблюдения, превосходящих половину радиуса Земли, упомянутое удержание называется ионосферным гидированием декаметровых радиоволн на протяженных трассах на частотах ниже максимально применимой частоты (МПЧ). Широко

известны результаты ионосферного гидирования в виде макромасштабных пространственных осцилляций волновых пакетов в волноводах «Земля — область F_2 » и «область E — область F_2 » (Гуревич, Цедилина, 1979; Яковлев и др., 2009). Вместе с тем следует отметить, что механизм скольжения поверхностных декаметровых радиоволн вдоль вогнутой поверхности ионосферы на протяженных трассах вполне «конкурентоспособен» с двумя названными механизмами.

В соответствии с этим ниже анализируются результаты соответствующих теоретических и отчасти экспериментальных исследований. Вначале рассматриваются свойства точного решения эталонной задачи определения пространственной структуры поля наземного источника между земной поверхностью и ионосферой с резкой границей (Bremmer, 1949; Макаров, Фёдорова, 1982). Далее предполагается, что установленные в таком решении волны, «прилипшие» к вогнутой поверхности ионосферы, сохранят свою структуру и в случае плавной модели ионосферы. Производится анализ структуры пути интегрирования в контурном интеграле Ватсона, представляющего собой модель процесса ионосферного гидирования декаметровых радиоволн на протяженных трассах. Затем оценивается роль различных факторов, приближающих исходную модель среды к реальным свойствам ионосферы.

Математическая модель процесса ионосферного гидирования декаметровых радиоволн

Представляется целесообразным рассмотреть решение эталонной модели процесса распространения декаметровых радиоволн в пространстве между земной поверхностью и ионосферой. В качестве такой модели выберем точное решение задачи о поле аксиально симметричного точечного наземного источника в сферически симметричной многослойной среде, когда свойства среды в целом описываются разрывной функцией от радиальной координаты r . Эта функция терпит разрывы, во-первых, на земной поверхности $r = a$, где радиус Земли $a \approx 6370$ км, далее — на границах дневных слоев E и $F1$

(предполагается, что эти области не окажут существенного влияния на результаты проводимого рассмотрения) и, наконец, на условной внутренней поверхности области $F2$ ионосферы $r = b$, при $b = a + h$, где h — внутренний радиус области $F2$ ионосферы. Тем самым определяются несколько областей с различными диэлектрическими проницаемостями: внутри земной поверхности, в пространстве между ней и ионосферой и в самой области $F2$ ионосферы.

Сошлемся на труды (Яковлев и др., 2009; Макаров, Фёдорова, 1982; Bremner, 1949; Фейнберг, 1999). Из них следует, что систему уравнений Максвелла в задаче о поле аксиально симметричного источника в сферически-слоистой среде можно свести к волновому уравнению для U — единственной, отличной от нуля, радиальной компоненты вектор-потенциала \vec{U} . В волновой зоне величина U пропорциональна радиальной компоненте поля. Решение волнового уравнения представимо в виде ряда зональных гармоник (Стрэттон, 1948). Существенно, что входящий в выражение для отдельной гармоники множитель — полином Лежандра — является осциллирующей функцией аргумента θ . Число пересечений им оси абсцисс равно номеру n на интервале изменения θ от нуля до π (Абрамовиц, Стеган, 1979). Вместе с тем электромагнитная волна характеризуется длиной λ , и дифракция не может значительно ее изменить. То есть в ряде зональных гармоник существенны те члены, номер которых близок к числу длин волн, укладываемых вдоль экватора, $n_{eq} = 2\pi a/\lambda$. Соответственно, для декаметрового диапазона n_{eq} является величиной порядка 10^6 . То есть для использования ряда Дебая применительно к моделированию процесса распространения декаметровых радиоволн потребовалась бы процедура его приближенного суммирования. Это, в свою очередь, потребовало бы наличия приближенных формул для $H_{n+1/2}^{(1),(2)}(x)$ в области, где и аргумент, и порядок характеризуются величиной n_{eq} . Такая математическая задача до сих пор не решена. Можно указать на главную причину этой трудности. Из экспериментов по наклонному зондированию ионосферы при регистрации кратных кругосветных

сигналов (Альперт, 1972; Краснушкин, 1982; Алебастров и др., 1984) известно, что они при каждом обороте вокруг Земли претерпевают затухание порядка 6—20 дБ, связанное с воздействием ионосферы. То есть помимо условия соответствующей периодичности возникает условие затухания модельной функции примерно в 2—10 раз при соответствующем изменении аргумента. Уатсон в своей знаменитой работе (Watson, 1919) нашел путь разрешения этих трудностей: сумма зональных гармоник Дебая была представлена в виде контурного интеграла Уатсона от выражения, стоящего под суммой, в котором вместо целочисленного значения n рассматривалась комплексная величина ν :

$$U \sim \int_C \frac{P_\nu(\cos(\pi - \theta)) g_\nu(a, \{\varepsilon(r)\}), g_\nu(r, \{\varepsilon(r)\})}{[1 - Q(\nu, \{\varepsilon(r)\})] \sin \pi \nu} d\nu$$

где $Q = R_1 \cdot R_2$.

Далее в соответствии с теоремой Коши о вычетах первоначальный контур C был деформирован так, чтобы охватить различные группы вычетов.

В работах (Vremmer, 1949; Макаров, Фёдорова, 1982; Калинин, Щекалин, 2013) дается трактовка деформации контура C . Его начальная структура в виде петли, охватывающей полуось $Re \nu$, обуславливает равенство интеграла ряду зональных гармоник. Далее контур C деформируется так, чтобы охватить все особенности подынтегрального выражения на плоскости ν . Можно утверждать, что существующие группы полюсов соответствуют различным механизмам гидирования декаметровых волн за горизонт.

На рис. 1 из работы Калинина и Щекалина (2013) приведена структура исходного контура C и структура его деформации в виде нескольких петель. И здесь существенна петля контура C_D . Ее положение определяется лишь свойствами области $F2$ и не зависит от наличия или отсутствия областей E и $F1$.

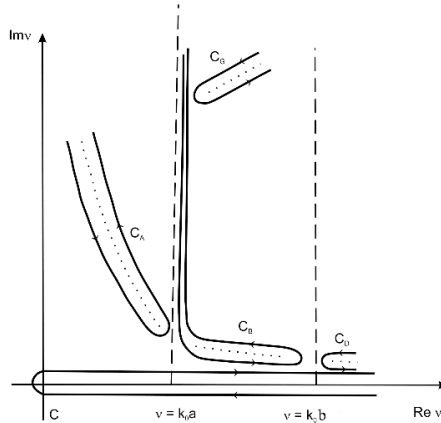


Рис. 1. Контур интегрирования в интеграле Ватсона.

В работе Макарова и Фёдоровой (1982) обосновывается представление о поверхностной волне, «прилипшей» к вогнутой поверхности $r = b$. Требуется также выделить волну с минимальным значением $Im \cdot v$, что побуждает к более подробному рассмотрению поведения исходного ряда Дебая и интеграла Ватсона в окрестностях точки $v = k_0 b$, то есть «петли» C_D на рис. 1.

Свойства зональных гармоник решения эталонной задачи на ионосферных высотах

В контексте работы Макарова и Фёдоровой (1982), где исходным является точное решение уравнений Максвелла в сферически слоистой среде, наиболее существенен вопрос о форме эквифазной поверхности электромагнитной волны на ионосферных высотах. При этом, как отмечено выше, радиальные зависимости поля выражаются точно с помощью функций $\xi_n^{(1),(2)}(kr)$, отличающихся множителем $(\pi kr/2)^{1/2}$ от соответствующих функций Ханкеля $H_{n+1/2}^{(1),(2)}(kr)$. Тип волн, образующих зональную гармонику, различен при $n > kr$ и при

$n < kr$ (что обусловлено различием асимптотик $\xi^{(1),(2)}(kr)$). Так, при $n > kr$ волны, входящие в состав зональной гармоники, являются неоднородными. Именно им соответствуют полюса, охватываемые контуром C_D (рис. 1). Их фазовые фронты описываются уравнением конуса $\theta = const$. Они перпендикулярны поверхностям $r = a$ и $r = b$. То есть эти волны можно также назвать коническими. Амплитуды этих неоднородных волн экспоненциально растут с ростом r , и это также побуждает их назвать волнами, «прилипшими» к вогнутой поверхности $r = b$.

В более реалистической модели границу между средами $r = b$ можно считать размытой. В известной монографии Бреховских (1973) приведен пример сохранения структуры полей совокупности мнимых источников при размытии стенок волновода. Можно ожидать, что положение о наличии прилипших волн в строгом решении (Макаров, Фёдорова, 1982) допускает перенос на ситуацию с размытыми границами. Геометрия этих прилипших волн схематически отображена на рис. 2. Кривая с внутренней штриховкой и знаками \exists — \exists соответствует земной поверхности.

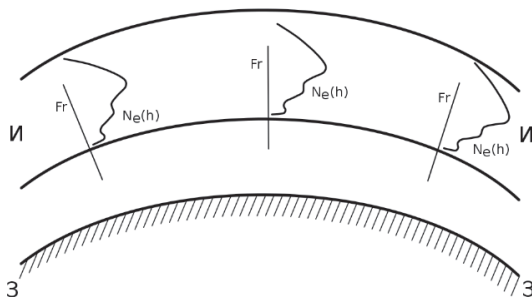


Рис. 2. Схема геометрии «прилипшей» волны.

Две кривые, между которыми находятся знаки $\text{И} — \text{И}$, соответствуют «границам» ионосферы. Радиальные отрезки, помеченные буквами Fr , соответствуют радиальным (вертикальным) фазовым фронтам «прилипшей» волны $\theta = const$. Они же играют

роль линий начального отсчета для отображения зависимостей амплитуды «прилиплишей» волны от высоты, то есть высотного множителя — знаки $N_e(h)$ на рис. 2.

Выбор подобной схемы геометрии основан на нескольких гипотезах. Во-первых, как уже отмечено, сделана попытка переноса конкретного результата работы (Макаров, Фёдорова, 1982) на ситуацию, когда резкие перепады свойств среды отсутствуют. Можно утверждать, что гидирующие свойства вогнутой поверхности есть довольно общее явление. Наличие на $n_e(h)$ -профиле «выступа», соответствующего E -области ионосферы, усложнит картину полюсов на рис. 1. В такой «пятислойной» модели среды появится «петля», охватывающая полюса, относящиеся к модам в « $E—F$ волноводе», свойства которых исследованы в работе (Гуревич, Цедилина, 1979). Однако можно утверждать, что и в этом случае будут существовать полюса, охватываемые петлей C_D . Возможны сближения отдельных полюсов, относящихся к каналу в « $E—F$ волноводе», и полюсов, относящихся к поверхностной скользящей волне. Однако, как будет показано ниже, таковые разрешаются в пространстве задержек сигналов. При этом в реальной ионосфере поверхностью «прилипания» служит геометрическое место точек перегиба профилей электронной концентрации в области $F2$ ионосферы.

Модели частотной зависимости обходного фактора кругосветных декаметровых радиосигалов

Обходный фактор Φ кругосветных сигналов декаметрового диапазона (КС) выражается через $\tau_{\text{КС}}$ -задержку КС и скорость света c с помощью соотношения $\Phi = c\tau_{\text{КС}}/D$, где $D \approx 40$ тыс. км, что равно длине окружности экватора.

В литературе известны, по крайней мере, две модельные схемы расчета Φ . В одной из них (Гуревич, Цедилина, 1979) на основе метода адиабатического инварианта (АИ) строилась модель функции $\Phi(f)$ -зависимости обходного фактора от частоты зондирования f . Модель сравнивалась с результатами измерений (Fenwick, 1963). Известны и другие работы (Калинин, Щекалин, 2013; Щелкалин,

2010), в которых $\varphi_{\text{КС}}$ -фаза КС рассчитывалась как интеграл вдоль линии, являющейся геометрическим местом точек экстремумов типа максимума вертикальных профилей приведенной диэлектрической проницаемости однослойной ионосферы $\bar{\epsilon}$. Результаты этих расчетов были сопоставлены и с измерениями (Fenwick, 1963), и с измерениями (Baster, Showen, 1979). Эти сопоставления привели к одному и тому же итогу. Метод АИ дает оценку «сверху» $\tau_{\text{КС}}$ и, соответственно, Φ . Метод линии максимумов (ЛМ) дает оценку «снизу». Однако в обеих работах имела место неопределенность данных об МПЧ КС. От этого недостатка свободны данные Центра коллективного пользования Восточно-Сибирского центра исследования ионосферы Земли (<http://gp.iszf.irk.ru/esceir/pres/lchm/vozmchlchm.htm>), см. рис. 3.

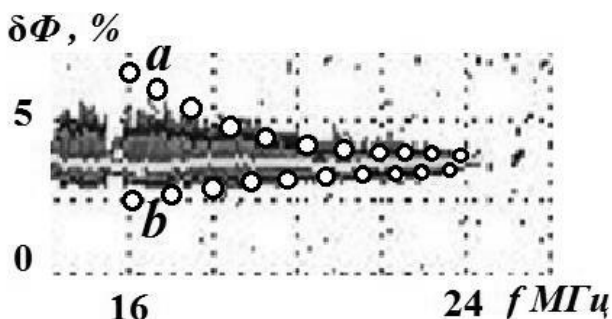


Рис. 3. Высокочастотная область вариаций обходного фактора среднеширотного КС, полученная по наблюдениям в Иркутске 22 января 1998 г., 07 UTC.

Здесь на плоскости $(f, \delta\Phi)$, где вариация $\delta\Phi = (c\tau_{\text{КС}} - D)/D$ представлена в процентах обходного фактора, нанесена область регистрации КС. При этом МПЧ КС равна 24 МГц. Ось области засветки сигналом соответствует задержке $\tau_{\text{КС}} \approx 138,5$ мкс. Модельные кривые вышеупомянутых работ на рис. 3 даны в виде кривых, состоящих из кружочков: *a* — по методу АИ, *b* — по методу ЛМ. Имеет место тенденция сближения обеих кривых вблизи МПЧ.

Представляется возможным дополнить результаты этих двух методов еще одним методом, а именно: заменить линию максимумов линией, соответствующей точкам перегиба $n_e(h)$ -профилей. Влияние такой замены можно оценить на модели функции относительной изменчивости профиля в виде $g(x) = 2E - E^2$, где $E = e^{x/H}$. При этом условие экстремума профиля приведенной диэлектрической проницаемости $\bar{\epsilon}$ принимает вид $g' = \gamma$. Здесь штрих означает дифференцирование по x/H и $\gamma = \frac{2H}{a}(f/f_0)^2$, где f_0 — критическая частота ионосферного слоя.

Рассмотрим частный случай, когда $H = 100$ км, а величина $(f/f_0)^2 = 10$. При этом $\gamma \approx 1/3$. Учитывая, что $E' = E$, для экстремального значения $y = E_e$ получим уравнение $\gamma = 2y - 2y^2$. Его решение $y \approx 0,15\gamma$. Это означает смещение высоты канала h_c от высоты максимума электронной концентрации h_m на величину примерно H . Теперь обратимся к точке перегиба функции $g(x)$, которая определяется корнем уравнения $g''(x) = 0$. Нетрудно получить, что решением этого уравнения является соотношение $E = 1/2$. Предполагая, что смещение кривых надо производить лишь на дневной стороне, следует увеличить модельную задержку на величину порядка 1 мкс, что эквивалентно приращению обходного фактора примерно на один процент. То есть модельная оценка становится несмещенной.

Далее надо сделать несколько замечаний. Прежде всего о том, что точки перегиба профилей электронной концентрации никак не связаны с частотой зондирования КС. То есть окрестности точек перегиба представляют собой размытую границу двух сред. Именно к ней следует отнести свойство «прилипания» волны к вогнутой поверхности, описанное в первом разделе, строго установленное в работе Макарова и Фёдоровой (1982). Таким образом, по данным всех трех работ, использующих одни и те же модельные аппроксимации, можно предположить, что из декаметровых радиоволн различного типа, гидрируемых ионосферой на протяженных трассах, именно поверхностная скользящая волна характеризуется наименьшей задержкой.

Заключение

Анализ тонкой структуры зональных гармоник в задаче о поле точечного источника, расположенного вблизи границы сферически слоистых сред, применительно к волнам декаметрового диапазона на ионосферных трассах позволяет установить ряд особенностей этих структур. В терминах контура интегрирования интеграла Ватсона, как точного решения эталонной задачи, обосновывается наличие «прилипшей» волны, по терминологии работы Макарова и Фёдоровой (1982). Следует отметить, что свойствами этого механизма можно объяснить значения, наблюдаемые экспериментально. Таким образом, с помощью радиофизических измерений параметров КС удалось установить важный геофизический результат — постоянство средней высоты точек перегиба профилей электронной концентрации области F_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамовиц М., Стеган И. (1979). Справочник по специальным функциям. — М.: Наука. 832 с.

Алебастров В. А., Гойхман Э. Ш., Заморин И. М., Колосов А. А., Корато В. А., Кузьминский Ф. А., Кукис Б. С. (1984). Основы загоризонтной радиолокации / Под ред. А. А. Колосова. — М.: Радио и связь. 256 с.

Альперт Я. Л. (1972). Распространение электромагнитных волн и ионосфера. — М.: Наука. 568 с.

Бреховских Л. М. (1973). Волны в слоистых средах. — М.: Наука. 343 с.

Гуревич А. В., Цедиллина Е. Е. (1979). Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. — М.: Наука. 248 с.

Калинин Ю. К., Щелкалин А. В. (2013). Загоризонтное распространение декаметровых радиоволн // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 2. С. 228—232.

Краснушкин П. Е. (1982). О дальнем и сверхдальнем распространении коротких волн // Радио. № 3. С. 14—17.

Макаров Г. И., Фёдорова Л. А. (1982). Метод многократно отраженных волн в задаче о распространении электромагнитных волн в регулярных волноводах // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 25. № 12. С. 1384—1409.

Стрэттон Дж. А. (1948). Теория электромагнетизма. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 539 с.

Фейнберг Е. Л. (1999). Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. — М.: Наука. 496 с.

Центр коллективного пользования Восточно-Сибирского центра исследования ионосферы Земли [Электронный ресурс] // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук. Иркутск. <http://rp.iszf.irk.ru/esceit/pres/lchm/vozmchlchm.htm>.

Щелкалин А. В. (2010). Моделирование дистанционно-частотных характеристик сигналов кругосветного эха / Сб. докладов XVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2010). Т. 2. — Воронеж. С. 1297—1301.

Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. (2009). Распространение радиоволн. — М.: ЛЕНАНД. 495 с.

Baster R. T., Showen R. L. (1979). Ducted Propagation in the Ionosphere for ICRM Surveillance Application // SRI Inst. Tech. Rep. № 48. P. 80—121.

Bremmer H. (1949). Terrestrial Radio waves. — Amsterdam: Elsevier Publ. 343 p.

Fenwick R. B. (1963). Round-the-World High-Frequency Propagation / Stanford Electronics Laboratory Technical report No. 71. Stanford University. California. USA. 106 p.

Watson G. N. (1919). The transmission of electric waves round the earth // Proc. Roy. Soc. V. A95. P. 546—563.

СУПЕРПОЗИЦИЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ И АВАРИЙНОСТЬ В АВИАЦИИ

Ю. К. Калинин, Ю. А. Репин, Е. Н. Хотенко

Институт прикладной геофизики
имени академика Е. К. Федорова
129128 Москва, ул. Ростокинская, 9
E-mail: kalinplat@rambler.ru
director@ipg.geospace.ru
khotenko@ipg.geospace.ru

Поступила в редакцию 14.11.2018
Поступила после доработки 10.12.2018

Введение

В настоящей статье рассматриваются гелиогеофизические возмущения (ГТВ), имеющие четкую временную привязку. К ним отнесены некоторые солнечные вспышки, магнитные бури, сильные землетрясения ($M \geq 6$). Для проверки гипотезы о наличии связи между названными возмущениями и авиационными происшествиями (авариями и катастрофами) применяется статистический метод установления связи между случайными импульсными потоками, называемый также методом наложения эпох. Для этого интервалы времени после каждого события одного из потоков разделяются на субинтервалы, и определяются факты попадания событий из другого потока в тот или иной субинтервал. В качестве первого потока выбирается совокупность того или иного вида возмущений за длительный период. В качестве интервала поиска связи выбирается неделя, что существенно меньше среднего интервала между возмущениями. В качестве субинтервала выбираются сутки, этого большей частью бывает достаточно для фиксации начала того или иного гелиогеофизического возмущения, рассматриваемого как

элемент импульсного случайного процесса. Для солнечных вспышек и магнитных бурь использованы данные, полученные на временных периодах, относящихся ко второй половине XX века (Ларичев, 2004), а для сильных землетрясений — данные за период 2006—2016 гг. (Калинин, Хотенко, 2016). Результаты представлены в виде гистограмм связи, на которых обнаруживаются локальные максимумы. Особое внимание уделяется явлению суперпозиции в отдельные сутки нескольких видов ГВ. Приводятся примеры событий, когда такая суперпозиция, названная авторами гелиогеофизической ямой, сопровождается авиационной катастрофой (происшествие с человеческими жертвами).

Гистограммы связи между гелиогеофизическими возмущениями и авиапроисшествиями

Солнечные вспышки. Рассматривались ситуации рентгеновских вспышек X-класса, сопровождавшихся выбросом корональной массы, координаты которых на солнечном диске находятся в пределах $25 < W < 60$, где W — градусы долготы на солнечном диске. Были выбраны недельные интервалы, относящиеся к периоду 1975—2002 г. За 39 недельных интервалов имело место 71 авиационное происшествие. Методом наложения эпох было построено распределение относительного числа авиационных происшествий, как функции числа дней после рентгеновской вспышки X-класса с солнечными координатами $25 < W < 60$ (см. рис. 1).

Гистограмма, представленная на рис. 1, содержит первый максимум, запаздывающий на двое суток по отношению к моменту вспышки. Это дает возможность оценки скорости распространения потока частиц — солнечного ветра $v_0 \approx 900$ км/с, что, по-видимому, относится к так называемому «быстрому» солнечному ветру.

Второй максимум на рис. 1 запаздывает примерно на 6 суток. Вероятно, это соответствует «медленному» солнечному ветру с пороговой оценкой скорости $v_0 \approx 150$ км/с.

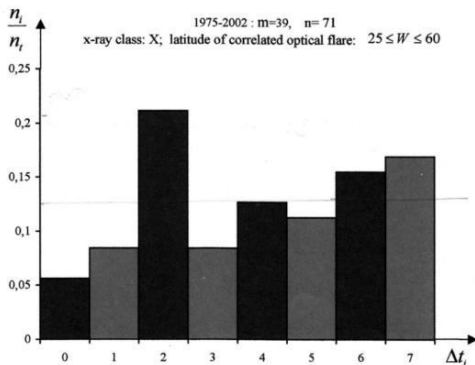


Рис. 1. Распределение относительного числа авиационных происшествий как функции числа дней после рентгеновской вспышки X-класса с солнечными координатами $25 < W < 60$.

Магнитные бури. Была осуществлена «привязка» интервалов к началу магнитных бурь. На рис. 2 представлена гистограмма относительного числа авиационных происшествий по различным суткам сдвига относительно начала магнитных бурь для 162-х авиационных происшествий, произошедших в 1981—1985 и 1988—1995 годах в интервалах, которым соответствует условие, относящееся к индексу A_p — $A_p > 40$. На рис. 2 сплошная линия относится к среднему значению, а две пунктирные линии выделяют область в пределах среднеквадратичного отклонения.

Значимое отклонение имеет место на четвертый день после начала магнитной бури. Однако пара дней: пятый и шестой — в совокупности тоже значима. То же самое можно сказать и о паре дней — первый и второй. Максимум воздействия приходится на четвертый день.

Сильные землетрясения. Приведем пример построения гистограммы связи между сильными землетрясениями ($6 \leq M$) и авиапроисшествиями. За период 2006—2016 гг. имели место около

50 авиапроисшествий, которые в 15-ти случаях предварялись катастрофическими землетрясениями магнитудой $6 < M$.

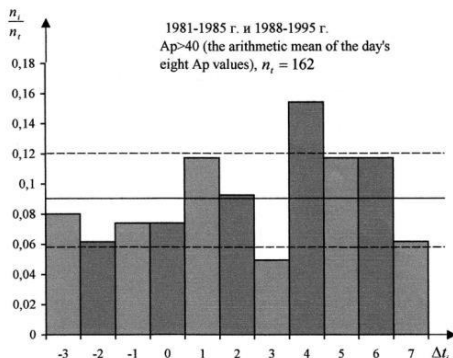


Рис. 2. Распределение относительного числа авиационных происшествий в период 1981—1985 и 1988—1995 при индексе $A_p > 40$.

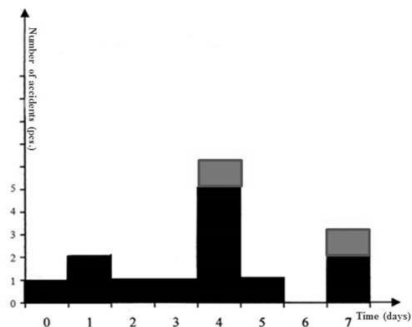


Рис. 3. Число авиапроисшествий, произошедших через различное количество дней после катастрофических землетрясений ($6 \leq M$) за период 2006—2016 гг. Светлые прямоугольники относятся к двум событиям последнего года.

Данные, представленные на рис. 3, свидетельствуют о том, что связь между авиапроисшествием и землетрясением наиболее отчетливо проявляется на четвертый день после катастрофического землетрясения.

Суперпозиция ГГВ и авиакатастроф в период январь—март 2010 г.

В качестве примера различных ситуаций можно выбрать первый квартал 2010 года. Во время зарождения мощной вспышки на Солнце 28 февраля 2010 г. произошло землетрясение в Чили с магнитудой 8,8. Отметим авиакатастрофы в январе—марте 2010 года. Гражданская авиация: 25 января — лайнер Боинг 737 — у Бейрута; военные истребители и вертолеты: 03 марта — Индия; 03 марта, 10 марта, 15 марта — США. Здесь мы имеем ситуацию авиакатастрофы в январе при полном отсутствии гелиогеофизических возмущений. Тогда как в феврале (за исключением последнего числа) нет ни того, ни другого. Наконец, в первой половине марта возникает упомянутая выше суперпозиция солнечной вспышки и магнитной бури. И здесь имеют место авиапроисшествия, относящиеся к военным истребителям и вертолетам.

Можно ввести представление о гелиогеофизической яме (терминологически — по аналогии с воздушной ямой), приравняв ее глубину дискретному числу перекрывающихся интервалов последствия различных гелиогеофизических возмущений.

Заключение

Анализ более чем полувековых данных о гелиогеофизических возмущениях и происшествиях в гражданской и отчасти военной авиации позволил установить статистическую связь между ними. После солнечных вспышек, магнитных бурь и катастрофических землетрясений на временных интервалах, длящихся несколько дней, повышается вероятность авиационных происшествий. В некоторых случаях гелиогеофизические возмущения происходят так, что

интервалы их последствия полностью или частично перекрываются, то есть происходит суперпозиция ГГВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ларичев И. Л. (2004). Воздействие гелиогеофизических факторов на аварийность в гражданской авиации / Автореф. дисс. ... кандидата техн. наук. Специальность 05.11.13 — приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. — М.: Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова. 146 с.

Калинин Ю. К., Хотенко Е. Н. (2016). Нелинейность пространственно-временного распределения упреждения авиационных катастроф сильными землетрясениями в 2006—2015 годах // *Нелинейный мир*. Т. 14. № 5. С. 61—63.

**НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПРАВОГО ПРИТОКА
РЕКИ ЧЕРЕК БЕЗЕНГИЙСКИЙ**

И. И. Батчаев, Л. Б. Чигирова

Высокогорный геофизический институт
360030 КБР, Нальчик, пр. Ленина, 2
E-mail: Leilyach@yandex.ru,
batcha17i@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.10.2018
Поступила после доработки 17.12.2018

Введение

Как показывает практика, в последние десятилетия на горной и предгорной территориях Кабардино-Балкарской республики идет значительное увеличение селевой активности. Интенсификация образования селей обусловлена активизацией склоновых процессов обвально-оползневой характера. Вызываемые оползнями селевые потоки являются наиболее характерными для селей дождевого и смешанного генезисов и в ряде случаев оказываются чрезвычайно разрушительными.

Целью работы является рассмотрение селепроявления в русле реки Ушхар суу — правого притока р. Черек Безенгийский.

1. Методика и результаты обследования

Для решения поставленной задачи 23 июля 2018 года авторами было проведено натурное маршрутное обследование русла с определением основных гидрологических и морфометрических характеристик, таких как: расход воды, скорость потока, водосборная площадь, длина, уклоны и т. д., влияющих на формирование русловых

процессов при сходах селевых потоков. При этом были определены и обследованы пять боковых притоков, по которым регулярно сходят селевые потоки (по типу преимущественно водокаменные) малой и средней мощности, приносящие в основное русло реки Ушхар суу большое количество селевого материала.

Обследуемый участок — русло р. Ушхар суу (историческое народно-этнографическое название) — расположен в Черекском ущелье в 6,2 км выше с. Бабугент и является правым притоком р. Черек Безенгийский. В Кадастре селевой опасности (2015) данный водоток значится под номером 4-31 с названием Тушхаркол и относится к виду селевого бассейна с объемом максимального единовременного выноса 50 тыс.м³. Бассейн р. Ушхар суу начинается от Скалистого хребта Кавказских гор и тянется с юго-запада на северо-восток. Наивысшей точкой бассейна является гора Иткая башы с абсолютной отметкой ∇ 3197 м. Вся площадь бассейна р. Ушхар суу составляет 44,4 км² при наибольшей ширине 5,2 км и длине 13,4 км со средним уклоном 174 ‰.

Река Ушхар суу берет свое начало на высоте около 2200 м и, протекая по узкому ущелью на протяжении 10,5 км, впадает в р. Черек Безенгийский на отметке ∇ 870 м, образуя перепад в 1330 м и средний уклон 127 ‰.

В 3,7 км выше устья русло реки раздваивается на два рукава, образуя V-образную форму. Этот участок обозначает границу между верхним и средним течениями, потому что уклоны ниже развилки уменьшаются и практически не меняются вплоть до впадения в основную реку — Черек Безенгийский. Выше же развилки по мере продвижения на юго-запад уклоны увеличиваются, создавая в русле бурный горный поток.

Левый рукав, расход воды в котором на момент обследования составлял ~80 л/с, больше и длиннее правого (с истоком у подножия горы Иткая башы). На его долю приходится более 60 % всей территории площади бассейна ~26,4 км². Дно русла усеяно большими камнями и валунами, которые часто образуют пороги и небольшие каскады водопадов (рис. 1). Самый крупный водопад находится в 2,4 км выше развилки и достигает высоты 12 м. Боковые склоны

лесистые крутые со значительными уклонами, а в некоторых местах резко переходят к скальным отвесным, сужая русло до 2,5—3 м (рис. 2).



Рис. 1. Русло р. Ушхар суу выше развилки с каменно-валунными отложениями.

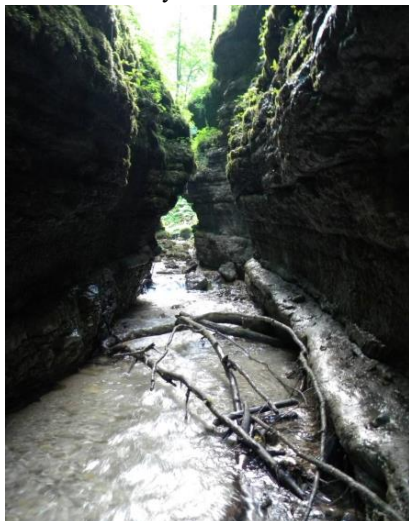


Рис. 2. Скальные боковые склоны р. Ушхар суу.

Русло р. Ушхар суу в верхнем течении не является селеносным. Селевые проявления замечены только в среднем и нижнем течениях. В результате натурного обследования по следам ранее прошедших селей и отложившихся в основном русле грунтово-каменных масс выявлено, что селевыми являются боковые притоки, впадающие в русло в среднем течении (ниже развилки). На этом участке 5 боковых селеносных притоков (2 правых и 3 левых), 4 из которых суходолы, а один ручей (левый) имеет расход $\sim 6\text{--}7$ л/с (на момент обследования), по которым сходят сели малой мощности с объемом выноса твердого материала от 200 до 3—4 тыс. м³. Все они являются селевыми руслами дождевого генезиса. По типу все сходящие здесь селевые потоки характеризуются, в основном, как водно-каменные с малым содержанием грунтового материала.

Особенностью русла р. Ушхар суу является то, что в среднем течении и вплоть до впадения в Черек Безенгийский на протяжении около 3,5 км русло реки безводное (сухое). Этот участок русла начинается в 200 м выше впадения в основную реку и тянется вверх до самой развилки. Весь водный поток р. Ушхар суу, с расходом ~ 110 л/с, ниже развилки уходит под каменное основание русла вследствие фильтрации в грунты, появляясь на поверхности только в самом конце устьевой части (рис. 3). Это обусловлено тем, что во время обильных ливневых дождей выносы грунтово-каменного селевого материала (в основном мелкий и крупный галечник) с включениями камней размерами до 20—25 см с боковых притоков откладываются в среднем и нижнем течении русла р. Ушхар суу (ниже развилки) из-за малых уклонов, в пределах 40—60 ‰, в результате чего уровень тальвега русла постепенно повышается, а уклон уменьшается (Ломтадзе, 1977).

Вследствие этого до реки Черек Безенгийский доходят в основном только мелкие взвешенные грунтовые частицы, вовлеченные в водный поток. Растительность на этом участке русла (в среднем и нижнем течении) полностью отсутствует. В устьевой части, в 80 м выше р. Черек Безенгийский, через русло р. Ушхар суу сооружен мост на автодороге Бубугент—Безенги. Ширина моста 10 м, высота 2 м, а уклоны на этом участке достигают 160 ‰ (рис. 4).



Рис. 3. Безводное русло р. Ушхар суу.



Рис. 4. Мост в устьевой части р. Ушхар суу.

2. Расчет гидрологических характеристик р. Ушхар суу

Материалы натурного обследования позволили произвести расчеты для оценки расходов воды и селевого потока в районе моста в нижнем течении р. Ушхар суу.

Для определения максимальной глубины потока в нижнем течении русла (в районе моста) был рассчитан максимальный единовременный расход воды 1 % обеспеченности во время дождевых паводков для бассейна р. Ушхар суу. В соответствии со СНиП 33-101-2003 для расчета использовалась формула:

$$Q_{1\%} = q'_{1\%} \cdot \varphi \cdot H'_{1\%} \cdot \delta \cdot \lambda_{1\%} \cdot A, \quad (1)$$

где $Q_{1\%}$ — максимальный мгновенный расход воды 1 % обеспеченности, м³/с;

$q'_{1\%}$ — максимальный модуль стока 1 % обеспеченности (определяется по таблице «Приложение 21» СНиП 33-101-2003) в зависимости от значений Φ_p и $\tau_{ск}$;

Φ_p — гидроморфометрическая характеристика русла определяется по формуле:

$$\Phi_p = \frac{1000 \cdot L}{\mu_p \cdot i_{cp}^\mu \cdot A^{0.25} (\varphi \cdot H'_{1\%})^{0.25}},$$

в которой

L — длина бассейна, км;

μ_p — гидравлический параметр русла;

μ — параметр русла;

A — площадь бассейна, км²;

φ — сборный коэффициент стока;

$H'_{1\%}$ — максимальный суточный слой осадков 1 % обеспеченности, определяемый по данным ближайших к бассейну метеорологических станций, мм;

i_{cp} — средний уклон водосбора;

δ — коэффициент, учитывающий снижение максимального стока реки для горных рек, равный 1;

$\tau_{ск}$ — продолжительность склонового добегаания в горных районах, мин;

$\lambda_{1\%}$ — переходный коэффициент от максимальных мгновенных расходов воды 1 % обеспеченности.

При максимальных значениях суточных осадков для этого района в 180 мм поток $Q_{1\%}$ составит 112 м³/с.

Для определения пропускной способности мостового пролета по формуле Шези определены основные параметры водного потока в русле р. Ушхар суу — скорости V и расхода Q (Рухадзе, 1984; Комлев, 2002; Справочник..., 1972):

$$Q = V\omega, \quad (2)$$

$$\text{где: } V = c\sqrt{Ri}; \quad R = \frac{\omega}{\chi}; \quad C = \frac{1}{n}R^{1/6}$$

Q — расход воды, м³/с;

V — скорость потока, м/с;

ω — площадь живого сечения, м²;

R — гидравлический радиус, м;

χ — периметр смоченной поверхности, м;

C — коэффициент Шези;

n — коэффициент шероховатости русла, равный для данного русла 0,25;

i — уклон русла в створе, равный 0,16.

Расчеты скорости V и расхода Q в створе приведены в табл. 1, по данным которой построен график зависимости высоты потока от

расхода воды 1 % обеспеченности с определением максимального значения высоты h (рис. 5).

Высота потока h в створе русла с учетом расхода 1 % обеспеченности равна 4,1 м.

Таким образом, мост в нижнем течении р. Ушхар суу с шириной 10 м и высотой пролета 2 м может пропустить только 40 м³ воды, а большая часть — 72 м³ водного потока — выплеснется на автодорогу, размывая и разрушая ее полотно.

Таблица 1

Расчеты скорости V и расхода Q в створе

№	h , м	ω , м ²	χ , м	R , м	i	C	V , м/с	Q , м ³ /с
1	1,5	15	13	1,154	0,16	4,1	1,76	26,4
2	2	20	14	1,43	0,16	4,25	2,03	40,7
3	3	30	16	1,875	0,16	4,44	2,43	73,0
4	4	40	18	2,22	0,16	4,57	2,72	108,8
5	4,5	45	19	2,37	0,16	4,62	2,84	127,8

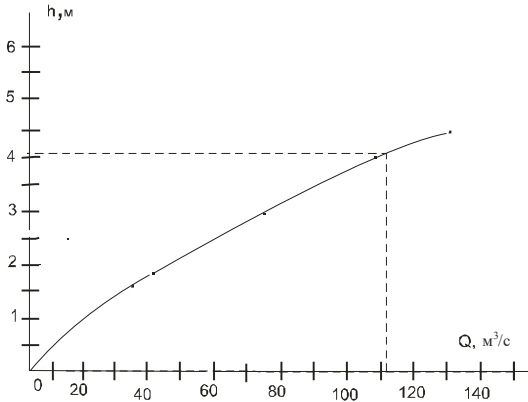


Рис. 5. График зависимости высоты h от расхода Q (р. Ушхар суу).

При прохождении по руслу р. Ушхар суу водного потока расходом более $100 \text{ м}^3/\text{с}$ он будет обогащаться мелким и средним грунтово-каменным материалом, а также карчами, ветками и стволами деревьев, образуя мощные селевые выносы.

Расчет максимального расхода селевого потока можно сделать по формуле (Флейшман, 1978):

$$Q_c = Q_B \eta, \quad (3)$$

где η — комплексный коэффициент селевого расхода, равный $3 \div 4$.

При среднем значении коэффициента η максимальный расход селевого потока будет равен $Q_c = 112 \times 3,5 = 392 \text{ м}^3/\text{с}$.

Максимальный расход селевого потока в 3,5 раза превышает значение максимального водного потока 1 % обеспеченности в устьевой части р. Ушхар суу. Следовательно, сход селевого потока максимальной мощности неизбежно приведет к затору мостового пролета с последующим размывом и завалом автодороги.

Заключение

Проведенные расчеты расходов воды и селевого потока в районе моста в нижнем течении р. Ушхар суу свидетельствуют о наличии реальной угрозы размыва и завала полотна автодороги Бабугент—Безенги.

Мост в устьевой части русла р. Ушхар суу не в состоянии обеспечить пропуск водного потока 1 % обеспеченности, что может привести к размыву и разрушению полотна автодороги Бабугент—Безенги. При прохождении же селевого потока данный участок автодороги неизбежно будет размыт или полностью завален селевыми выносами с включениями карчей и стволов деревьев. Это может привести к разрыву наземного сообщения с двумя горными селами, пограничным городком и альплагерем «Безенги» на неопределенный срок. Река Ушхар суу представляет угрозу жизнедеятельности для местного населения и проезжающих автомобилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кадастр селевой опасности юга Европейской части России (2015) / Под ред. Н. В. Кондратьева и др. — М.: ООО «Феория». 148 с.

Комлев А. М. (2002). Закономерности формирования и методы расчетов речного стока. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та. 163 с.

Ломтадзе В. Д. (1977). Инженерная геология. — Л.: Недра. 480 с.

Рухадзе Н. В. (1984). К определению скоростей течения паводков и селевых потоков при проектировании селезащитных и селепропускных сооружений // Гидрологические и гидротехнические проблемы противоселевых мероприятий. Вып. 83 (903). С. 60—66.

СНиП 33-101-2003 (2004) — Москва. 83 с.

Справочник по гидравлическим расчетам (1972) / Под ред. П. Г. Киселева. — М.: Энергия. 238 с.

Флейшман С. М. (1978). Сели. — Л.: Гидрометеиздат. 312 с.

ПАМЯТИ НИНЫ НИКОЛАЕВНЫ КАЛИТИНОЙ

(1926—2018)

3 сентября 2018 года закончила свой земной путь Нина Николаевна Калитина — известный российский историк искусства, доктор искусствоведения, почетный профессор Санкт-Петербургского государственного университета.



Н. Н. Калитина в последние годы жизни.

Нина Николаевна была дочерью известного геофизика, основоположника отечественной актинометрии Николая Николаевича Калитина (1884—1949). Детские годы Нины Николаевны прошли в Павловске, где располагалась экспериментальная база Главной физической обсерватории — Павловская магнитно-метеорологическая обсерватория, и где Н. Н. Калитин с 1931 по 1941 гг. возглавлял Институт актинометрии, известный как «Дворец Солнца». Она с младенчества была знакома со многими сотрудниками обсерватории

и членами их семей. Тесные связи с «павловцами» Нина Николаевна пронесла через всю жизнь. Среди ее друзей-геофизиков были известные ученые К. С. Шифрин, Ю. Д. Янишевский, Е. А. Полякова, Н. П. Русин и многие другие.

Калитины вернулись из эвакуации в августе 1944 года и сразу же поехали в Сельцы (так тогда именовался поселок Воейково). Николай Николаевич стал одним из активных участников воссоздания там загородной базы ГГО, до основания разрушенной фашистами в Павловске. Он разработал проект будущего павильона Актинометрии и лично следил за ходом работ. Но до открытия своего последнего детища, которое состоялось в 1953 году, не дожил.

Нина Николаевна всегда очень дорожила памятью отца. К его юбилейным датам она опубликовала в издававшихся Главной геофизической обсерваторией сборниках несколько биографических очерков. В 1984 г. Н. Н. Калитина выступала на заседании Ученого совета ГГО, посвященном 100-летию Николая Николаевича, всегда с интересом следила за событиями, происходящими в Главной геофизической обсерватории, была гостем юбилейных торжеств, посвященных 150-летию ГГО, и более скромных мероприятий — юбилеев знакомых сотрудников. В 2009 г. Нина Николаевна передала в ГГО копии фотографий Н. Н. Калитина из семейного архива. Одна из этих фотографий приводится ниже.



Н. Н. Калитин с дочерью. 1939 г.

В 2005 г. Нина Николаевна опубликовала книгу «Странички воспоминаний». Эта книга невелика по объему, и содержит пять глав: «Павловск», «Война», «Университет», «Франция», «Ленинград—Петербург. Ближние и дальние дороги». Из первых глав этой книги читатель может узнать много нового не только о жизни и деятельности Н. Н. Калитина, но и о той активной работе, которая велась в Павловской обсерватории в предвоенные годы.



Книга воспоминаний Н. Н. Калитиной.

Нину Николаевну Калитину похоронили на кладбище Красная Горка рядом с мужем. Среди провожавших её в последний путь были и сотрудники ГГО. Родственники Нины Николаевны благодарят коллектив ГГО за бережное и чуткое отношение к памяти рода Калитиных, нынешние представители которого остаются связанными с родными их сердцу местами: Колтушами—Воейково.

*Т. К. Михалкова, дочь Н. Н. Калитиной,
и Главная геофизическая обсерватория*

Радиолокационные и спутниковые наблюдения слияния кучево-дождевых облаков и выпадающих из них осадков. Синькевич А. А., Матросов С. Ю., Попов В. Б., Михайловский Ю. П., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 7—24

Исследуется изменение характеристик двух кучево-дождевых облаков и осадков из них при слиянии. Анализируется их микроструктура. Продемонстрировано, что слияние облаков резко изменило временной тренд исследуемых характеристик. Отмечается увеличение высоты верхней границы облака, увеличение радиолокационной отражаемости, объема переохлажденной части. Максимальная интенсивность осадков по радиолокационным данным и, рассчитанная по радиометрическим данным, увеличилась в 1,5—2 раза, а поток осадков возрос в 2—4 раза после слияния облаков.

Ключевые слова: кучево-дождевое облако, слияние, град, радиолокатор, радиометр, осадки.

Ил. 6. Библ. 19.

Исследование связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками для многоячейкового кучево-дождевого облака. Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Абшаев А. М. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 25—41.

Выполнено детальное исследование связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками грозоградового кучево-дождевого облака с помощью данных, полученных с использованием дистанционных средств измерений (радиолокатора, грозопеленгатора и радиометра). Установлена тесная корреляционная связь частоты электрических разрядов с объемом переохлажденной части облака, имеющей отражаемость более 35 дБZ.

Максимальная частота молний из исследуемого облака была равна 32 мин^{-1} . В это время на 4,6 внутриоблачных разрядов приходится лишь 1 разряд “облако–облако” или “облако–земля”. Верхняя граница облака находилась на высоте 12,8 км, максимальное значение радиолокационной отражаемости по облаку было равно 60 дБZ, интенсивность осадков составляла 66 мм/ч.

Ключевые слова: кучево-дождевое облако, электрические разряды, радиолокатор, радиометр, грозопеленгатор.

Ил. 3. Библ. 17

УДК 551.576.1: 551.501.8

Экспериментальные исследования погрешности измерений широкополосными грозопеленгаторами. Снегуров А. В., Снегуров В. С. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 42—81.

Приведены результаты экспериментальных исследований погрешности измерения азимута широкополосными пеленгаторами гроз. Показано, что систематическая ошибка измерений изменяется от 22—23 до 37 градусов. На расстояниях от 100 до 2000 км ошибка изменяется от 10 до 32 градусов. От 10 до 100 км ошибка уменьшается от 35 до 15 градусов. Это можно объяснить поляризационным эффектом.

Ключевые слова: широкополосные грозопеленгаторы, электромагнитное излучение молний, погрешности измерения пеленга.

Табл.14. Ил. 9. Библ. 34.

УДК 551.501.777

Физико-статистическая модель одноячейковых градовых облаков и осадков по данным радиолокационных наблюдений. Аппаева Ж. Ю. Труды ГГО. 2019. Вып. 591. С. 82—91.

По результатам радиолокационных исследований грозо-градовых процессов, наблюдавшихся на территории Северного Кавказа в летние периоды 2011—2016 гг., с использованием «АСУ–МРЛ» выявлены 64 конвективные ячейки (КЯ) в радиусе 100 км обзора локатора. На основе обобщения данных радиолокационных наблюдений построена физико-статистическая модель одноячейковых градовых облаков.

Ключевые слова: радиолокация, одноячейковые градовые облака, физико-статистическая модель, распределения, осадки.

Ил. 8. Табл. 1. Библ. 10.

Вариации электрического поля атмосферы, обусловленные гармоническими вариациями токов грозových генераторов в модели глобальной электрической цепи в атмосфере. Морозов В. Н. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 92—104.

Приведено математическое решение задачи о влиянии гармонических колебаний токов грозových генераторов на электрическое поле атмосферы. Полученные решения показывают, что в случае очень низких частот колебаний имеет место квазистационарный режим колебаний, когда существенную роль в динамике электрического поля атмосферы токи проводимости. В случае очень высоких частот основной вклад в колебания электрического поля вносят токи смещения и вариации электрического поля носят кулоновский характер. В промежуточном случае вследствие роста электрической проводимости атмосферы возникают две сферические области, в нижней области работает кулоновское приближение, а в верхней текут токи проводимости. Для этих случаев получены приближенные выражения для потенциала ионосферы.

Ключевые слова: глобальная электрическая цепь, потенциал ионосферы, электрическая проводимость атмосферы, токи грозových генераторов, гармонические колебания.

Табл. 1 .Библ. 8.

УДК 551.513.7

Применение аппарата естественных ортогональных функций для анализа крупномасштабных динамических процессов в средней атмосфере. Ракушина Е. В., Кандиева К. К., Анискина О. Г., Погорельцев А. И. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 105—123.

Рассмотрено применение аппарата естественных ортогональных функций (ЕОФ) для анализа отклика среднеширотной стратосферы на квазидвухлетнее колебание зонального ветра (КДК) и осцилляцию Маддена—Джулиана (ОМД). Проведен анализ вертикальной структуры КДК зонального ветра и выделено 4 типа КДК, которые могут быть использованы при изучении влияния КДК на атмосферные процессы в средних и высоких широтах. Показано применение аппарата ЕОФ при использовании нескольких метеорологических полей для исследования сигнала ОМД в стратосфере.

Ключевые слова: аппарат естественных ортогональных функций, квазидвухлетнее колебание зонального ветра, осцилляция Маддена — Джулиана

Ил. 7. Таб. 1. Библ. 15.

УДК 681.518:551.50:551.501

Оценка возможностей ГИС-технологий для позиционирования пунктов метеорологических наблюдений. Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. В., Симакина Т. Е. Труды ГГО. 2019. Вып. 591. С. 124—140.

Рассмотрены возможности применения геоинформационных технологий при выборе мест для установки метеорологических радиолокаторов и размещения метеорологических наблюдательных станций. На примере конкретной территории выполнен поиск и локализация потенциально пригодных мест размещения, соответствующих большинству требований к ним. Используемые методы ГИС-технологии рекомендуются для автоматизации выполнения предварительной оценки местности и составления карты потенциально оптимальных мест установки наблюдательных пунктов с учетом всего комплекса требований, предъявляемых к позиции их размещения.

Ключевые слова: метеорологические радиолокаторы, метеорологические станции, геоинформационные технологии, выбор позиции для радиолокаторов.

Ил. 13. Библ. 13.

Риски угроз здоровью населения от воздействия волн жары на юго-востоке Западной Сибири и проблемы адаптации. Лучицкая И. О., Белая Н. И. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 141—156.

Рассматриваются региональные аспекты по оценке рисков нанесения вреда здоровью населения от воздействия волн жары на основе факторов - подверженность и уязвимость. Исследованы тенденции изменения и изменчивости частоты периодов аномально жаркой погоды. Дополнен перечень людей группы риска исходя из специфики социально-экономической деятельности субъектов. На примере уязвимой категории (люди 65 лет и старше) получены оценки социального риска угроз для здоровья от воздействия жары и выполнено сравнение с клиническими данными статистики последствий. Предложен комплекс адаптационных мер, рекомендованных в практике защиты здоровья населения от воздействия волн жары, в сфере здравоохранения и социальных служб, включая слежение за тенденциями факторов риска.

Ключевые слова: аномальная жара, здоровье населения, риски, адаптация, специализированная база данных

Илл. 4. Табл. 4. Библ.16.

Ионосферное гидирование декаметровых радиоволн. Калинин Ю. К., Репин А. Ю., Хотенко Е.Н., Щелкалин А. В. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 156—166.

Точное решение уравнений Максвелла для поля наземного аксиально-симметричного излучателя декаметровых радиоволн в трёхслойной сферически симметричной среде рассматривается на ионосферных высотах, как источник поверхностной волны, скользящей по внутренней поверхности ионосферы. Анализ структуры зональных гармоний и контура интегрирования в интеграле Ватсона позволяет выделить в зональных гармониках компоненты скользящей волны в виде волны, «прилипшей» к вогнутой поверхности ионосферы. Обосновывается гипотеза о переносе данного подхода на случай многослойной ионосферы. В реальной ионосфере поверхностью «прилипания» служит геометрическое место точек перегиба профилей электронной концентрации в области F2 ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, декаметровые радиоволны, ионосферное гидирование, скользящая волна, интеграл Ватсона.

Ил. 3. Библ. 17.

УДК 517.9+519.6

Суперпозиция гелиогеофизических возмущений и аварийность в авиации. Калинин Ю. К., Репин А. Ю., Хотенко Е. Н. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 167—172.

Методом наложения эпох устанавливаются связи между гелиогеофизическими возмущениями (ГВ) – солнечными вспышками, магнитными бурями, сильными землетрясениями и аномальным поведением пилотов гражданских лайнеров, приводящим к авиационным происшествиям (АП) – авариям и катастрофам. Отмечается, что в отдельных случаях возникают суперпозиция ГВ, совпадающая по времени с АП. Приводятся примеры таких совпадений. Вводится представление о «гелиогеофизических ямах» - кратких периодах резкого уменьшения безопасности функционирования авиации, ассоциирующихся с суперпозицией ГВ.

Ключевые слова: гелиогеофизические возмущения, солнечные вспышки, магнитные бури, землетрясения, суперпозиция, гелиогеофизические ямы, авиационное происшествие.

Ил. 3. Библ. 2.

Натурные исследования гидрологических характеристик правого притока реки Черек Безенгийский. Батчаев И. И., Чигирова Л. Б. Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 173—182.

Приводится описание расположения исследуемого участка с определением основных гидрологических и морфометрических характеристик, таких как: расход воды, скорость потока, водосборная площадь, длина, уклоны и т. д., влияющих на формирование русловых процессов при сходах селевых потоков. Определены пять боковых притоков по которым регулярно сходят селевые потоки (по типу преимущественно водокаменные) малой и средней мощности, которые выносят в основное русло реки Ушхар суу большое количество селевого материала. Приведены расчеты расходов воды и селевого потока в районе моста в нижнем течении р.Ушхар суу. Выявлена угроза размыва и завала полотна автодороги Бабугент-Безенги, что приведет к разрыву наземного сообщения с выше расположенными двумя сельскими поселениями, пограничным городком и высокогорным альплагерем «Безенги».

Ключевые слова: селевой бассейн, площадь, расход воды, русло реки, уклон.

Ил. 5. Табл. 1. Библ. 7.

Radar and satellite observations of the Cb merging and precipitation from them. Sinkevich A. A., Matrosov S. Yu., Popov V. B., Mikhailovskii Yu. P., Dovgalyuk Yu. A., Veremei N. E. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 7—24.

Changes in the characteristics of two Cb clouds and corresponding precipitation as a result of cloud merging are studied. Cloud microstructure is analyzed. It was found that Cb merging noticeably changed temporal trend of cloud characteristics. Cloud top height, radar reflectivity and supercooled cloud volume increased as a result of merging. Maximum precipitation intensity inferred from radar data and, calculated from satellite radiometric measurements, increased by a factor of 1,5—2, and the precipitation flux by a factor of 2—4 after cloud merging.

Keywords: Cb, merging, hail, radar, radiometer, precipitation.

Fig. 6. Ref. 19.

Investigation of the Relationship of Electrical Discharges Frequency with Radar Characteristics of Multicell Cb. Sinkevich A. A. Michailovsky Yu. P., Abshaev A. M. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 25—41.

Detailed study of the relationship of electrical discharges frequency with radar characteristics of thunderstorm with hail was carried out. Data of remote measurements (radar, lightning detection network and radiometer) were used. Close correlation between the frequency of electrical discharges and supercooled cloud volume with reflectivity greater than 35 dBZ was found.

Maximum lightning frequency was equal to 32 min^{-1} in the studied cloud. At this time, 4.6 intra-cloud discharges account for only 1 cloud-to-cloud or cloud-to-earth discharge. Cloud top was equal to 12.8 km, maximal reflectivity — 60 dBZ, precipitation intensity — 66 mm/h.

Keywords: Cb, electrical discharges, radar, radiometer, precipitation.

Fig. 3. Ref. 17.

Experimental study of measurement accuracy of wideband direction finders thunderstorms. Snegurov A. V., Snegurov V. S. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 42—81.

The results of experimental research of measurement errors of the azimuth broadband direction finders thunderstorms. It is shown that the systematic measurement error varies from 22—23 to 37 degrees. At distances from 100 to 2000 km, the error varies from 10 to 32 degrees. From 10 to 100 km error is reduced from 35 to 15 degrees. This can be explained by the polarization effect.

Keywords: wideband direction finders, electromagnetic radiation of lightning, bearing measurement errors.

Tab. 14. Fig. 9. Ref. 34.

Physical-statistical model of single-cell hail clouds and precipitation according to radar observations. Appaeva Z. Yu. Proceedings of MGO. 2019. V. 591. P. 82—91.

64 convective cells (CCs) were identified within 100 km radius of the locator survey based on the results of radar studies of thunderstorm processes using «ASU – MRL», observed in the North Caucasus during the summer periods of 2011—2016.

The physico-statistical model of single-cell hail clouds is based on a summary of raar observations.

Keywords: Radar, single-cell hail clouds, physical and statistical model, distributions of the main radar parameters, precipitation.

Fig. 8. Tab. 1. Ref. 10.

Variations of the atmospheric electric field due to harmonic currents of thunderstorm generators in the model of the global electrical circuit in the atmosphere. Morozov V. N. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 92—104.

The paper presents a mathematical solution to the problem of the influence of harmonic oscillations of currents of thunderstorm generators on the electric field of the atmosphere. The obtained solutions show that in the case of very low oscillation frequencies, a quasistationary mode of oscillations takes place, when the conduction currents are significant in the dynamics of the electric field of the atmosphere. In the case of very high frequencies, the main contribution to the oscillations of the electric field is made by bias currents and variations of the electric field are of Coulomb nature. In the intermediate case, two spherical regions arise due to an increase in the electrical conductivity of the atmosphere, the Coulomb approximation works in the lower region, and the conductivity flows in the upper region. For these cases, approximate expressions are obtained for the ionospheric potential.

Keywords: global electric circuit, ionosphere potential, electrical conductivity of the atmosphere, currents of thunderstorm generators, harmonic oscillations.

Tabl. 1. Ref. 8.

Application of the empirical orthogonal functions for the analysis of the lager-scale dynamical processes in the middle atmosphere. Rakushina E. V., Aniskina O. G., Kandieva K. K., Pogoreltsev A. I. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 105—123.

The application of Empirical Orthogonal Functions (EOFs) approach to analyze the middle-latitude stratosphere response to the Quasi Biennial Oscillation (QBO) and Madden — Julian Oscillation (MJO) has been considered. There have been detected four types of QBO in the vertical profile of the zonal mean wind, which could be used in a study related to influence of QBO on atmosphere processes at the middle and high latitudes. Application of the EOFs analysis of combined field has been demonstrated to investigate the MJO manifestation in the stratosphere.

Keywords: Empirical orthogonal functions, QBO and MJO.

Fig. 7. Tab. 1. Ref. 15.

Estimation of possibilities of GIS-technology for positioning of meteorological observation ITEMS. Voskanan K. L., Kuznetcon A. D., Serouhova O. S., Simakina T. E. Proceedings of MGO. 2019. V. 591. P. 124—140.

The possibilities of using geographic information technologies when choosing places for installing meteorological radar stations and locating automatic ground meteorological stations are considered. Using a specific territory as an example, a search and localization of potentially suitable locations corresponding to existing requirements was carried out. The methods of geographic information technologies used are recommended for automating the finding of optimal locations for observation points.

Keywords: meteorological radars, meteorological stations, geo-information technologies, choice of position for radars.

Fig. 13. Ref. 13.

Risks to public health from the effects of heatwaves at the south-east of western Siberia and problems of adaptation. Luchitskaya I. O., Belaya N. I. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 141—156.

The article deals with the regional aspects of assessing the risk of harming the population health of the created by the waves of heat, based on the analysis of influencing factors — susceptibility and vulnerability. The optimal risk criterion for the effects of heat waves in the continental climate of the region is substantiated. The trends towards a change in the frequency of heatwaves were investigated, the list of risk groups among the population was updated based on the specifics of socio-economic activities of the subjects. On the example of the vulnerable category (people aged 65 years and older), the estimates of social risk and economic damage from the effects of heat were obtained and compared with statistical data of clinical consequences in different manifestations and indicators of financial expenditures. A package of measures for adaptation of health care structures and social services is proposed taking into account climatic and demographic trends.

Keywords: abnormal heat, public health, risks, adaptation, specialized database.

Fig. 4. Tabl. 4. Ref. 16.

Ionospheric guiding of decametric radio waves. Kalinin Yu. K., Repin A. Yu., Khotenko E. N., Shchelkalin A. V. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 156—166.

The exact solution of Maxwell's equations for field of ground axial symmetric emitter decameter radio waves in a spherically symmetric three-layer environment is considered at the ionospheric heights as a source of surface waves moving along the inner surface of the ionosphere. Analysis of the structure of the zonal harmonics and the integration contour in the integral Watson allows you to highlight the components of the moving waves as a superposition of helical waves and waves in zonal harmonics, "adherent" to the concave surface of the ionosphere. Substantiates the hypothesis of transfer this approach to the case of five-layer ionosphere.

Keywords: ionosphere and decameter radio waves, ionospheric guiding, sliding wave, Watson's integral.

Fig. 3. Ref. 17.

Superposition of helio-geophysical disturbances and aviation perturbations. Kalinin Yu. K., Repin A. Yu., Khotenko E. N. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 167—172.

The method of overlapping epochs establishes links between helio-geophysical disturbances (HGD). They are: solar flashes, magnetic storms, strong earthquake and aviation perturbation (AP). In some cases, superposition of HGD, which coincides in time with AP, arises. Examples of such coincidents are given. An idea of "helio-geophysical pits" is introduced. It is a short period of sharp decrease in safety of aviation functioning, which is associated with superposition of HGD.

Keywords: helio-geophysical disturbance, solar flares, magnetic storms, earthquakes, superposition, helio-geophysical pits, aviation perturbation.

Fig. 3. Ref. 2.

Natural research hydrological characteristics right river flow Cherek Bezengiski. Batchaev I. I., Chigirova L. B. Proceedings of MGO. 2018. V. 591. P. 173—182.

The description is given of the location of the study area with the definition of the main hydrological and morphometric characteristics, such as: water flow, flow rate, catchment area, length, slope, affecting the formation of channel processes during mudflows. Five lateral tributaries have been identified, along which mudflows (of predominantly water-stone type) of low and medium thickness regularly flow down, which carry a large amount of mudflow material into the main riverbed of Ushkhar Suu. The calculations of water flow and mudflow in the area of the bridge in the lower reaches of the Ushkhar Suu river are given. The threat of erosion and blockage of the Babugent-Bezengi highway was revealed, leading to a break in ground communication with the above-located two rural settlements, the border town and the Bezengi high-altitude camp.

Keywords: mud pond, area, water flow, river bed, skew.

Fig. 5. Tab. 1. Ref. 7

Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 591

Подписано в печать 14.03.19. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 12,625. Тираж 300 экз. Заказ №6780.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ». 195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28Ц, оф. 1Н.