

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

592

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

Санкт-Петербург
2019

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»,
2019

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| <i>Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей, А. А. Синькевич Ю. П. Михайловский, М. Л. Торопова.</i> Исследование динамики электрической структуры грозо- градового кучево-дождевого облака по данным трехмерного численного моделирования (на примере северо-запада России). | 7 |
| <i>В. Н. Морозов.</i> Взаимодействие облачных зарядовых структур с окружающей проводящей атмосферой с неоднородной электрической проводимостью. | 23 |
| <i>К. Л. Восканян, И. С. Заморин, С. В. Крюкова, А. Д. Кузнецов, О. С. Сероухова, Т. Е. Симакина, А. С. Солонин.</i> Сопоставление эффективности обнаружение метеорологических объектов двумя доплеровскими радиолокаторами на территории Ленинградской области. | 80 |
| <i>Е. В. Ковачева, О. П. Шарикова, И. Г. Гуревич.</i> Результаты внедрения новых методик в лабораториях сети мониторинга загрязнения атмосферы Росгидромета. | 98 |
| <i>Е. М. Ладохина, О. Г. Анискина.</i> Прогноз пожароопасности для Европейской территории России на основе гидродинамического прогноза полей метеорологических величин. | 113 |
| <i>Е. А. Выходцева, Н. А. Новикова, И. А. Иванова, Я. В. Дробжева.</i> Условия возникновения и прогнозирование штормового ветра в районе городов Орска и Петропавловска на территории Южно- Уральской железной дороги. | 129 |
| <i>Б. А. Ашабоков, А. А. Ташилова, Л. А. Кешева.</i> Изменения характеристик снежного покрова на юге ЕТР как отклик глобального потепления. | 141 |

| | |
|--|-----|
| <i>О. М. Ступишина, Е. Г. Головина.</i> Результаты анализа одновременной изменчивости параметров космической и земной погоды. | 159 |
| <i>П. Л. Стерхов.</i> Электрическая проводимость воздуха и метеорологическая дальность видимости. | 172 |
| Мария Васильевна Заварина (к 110-летию со дня рождения). | 181 |
| Лариса Ракиповна Ракипова (к 100-летию со дня рождения). | 184 |

CONTENTS

| | |
|--|-----|
| <i>Dovgalyuk Yu. A., Veremei N. E., Sinkevich A. A., Mikhailovsky Yu. P., Toropova M. L.</i> Investigation of the Electrical Structure of Cb with Hail using Three-dimensional Numerical Simulation (based on the case, observed in the north-west of Russia). | 7 |
| <i>Morozov V. N.</i> The interaction of cloud charge structures with the surrounding conducting atmosphere with non-uniform electrical conductivity. | 23 |
| <i>Voskanyan K. L., Zamorin I. S., Kryukova S. V., Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S., Simakina T. E., Solonin A. S.</i> Comparison of the efficiency of detection of meteorological objects by two Doppler radars in the territory of the Leningrad Region. | 80 |
| <i>Kovacheva E. V., Sharikova O. P., Gurevich I. G.</i> The results of the introduction of new methods in the laboratories of the Rosgidromet atmosphere pollution monitoring network. | 98 |
| <i>Ladoghina E. M., Aniskina O. G.</i> Forecast of fire hazards based on hydrodynamic forecast. | 113 |
| <i>Vykhodtseva E. A., Novikova N. A., Ivanova I. A., Drobzheva, Y. V.</i> The conditions of appearance and prediction of wind storm in the city of Orsk and the city of Petropavlovsk at the territory of the South-Ural railway. | 129 |
| <i>Ashabokov B. A., Tashilova A. A., Keshiva L. A.</i> Changes in snow cover characteristics in the south of ETR as a response to global warming. | 141 |
| <i>Stupishina O. M. Golovina E. G.</i> The results of the analysis of the simultaneous variability of the parameters of cosmic and terrestrial weather. | 159 |

| | |
|---|-----|
| <i>Sterhov P. L.</i> Electrical conductivity of air and meteorological visibility. | 172 |
| Maria V. Zavarina. | 181 |
| Larisa R. Rakipova. | 184 |

УДК 551.576.11.001.572

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
СТРУКТУРЫ ГРОЗО-ГРАДОВОГО КУЧЕВО-ДОЖДЕВОГО
ОБЛАКА ПО ДАННЫМ ТРЕХМЕРНОГО
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ)**

*Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей,
А. А. Синькевич, Ю. П. Михайловский, М. Л. Торопова*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
e-mail: dovgaluk35@mail.ru,
veremey@gmail.com,
sinkevich51@mail.ru,
yupalych@yandex.ru,

Поступила в редакцию 24.12.2018
Поступила после доработки 1.04.2019

Введение

Наблюдающиеся в настоящее время изменения климата сопровождаются увеличением повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды (катастрофические ливни, грозы, град, шквалы, смерчи и др.). Эти явления наносят ущерб экономике и представляют опасность для населения.

Одним из важнейших методов исследования погоды и климата в целом и опасных метеорологических явлений в частности является численное моделирование (Коган и др., 1984). Оно дает возможность анализировать взаимосвязи облачных процессов, воспроизводить одни и те же случаи с разными параметрами, а также интерпретировать результаты расчетов. Численные модели позволяют выполнять прогноз опасных явлений, разрабатывать и совершенствовать методы

активного воздействия на них (Ашабоков и др., 2016; Владимиров, Пастушков, 2016; Белова, Дрофа, 2016).

В настоящей статье с помощью численного моделирования проведен анализ грозо-градового процесса, наблюдавшегося в Санкт-Петербурге 22.07.2017 г. Указанный случай примечателен тем, что подобные явления в данном физико-географическом регионе наблюдаются крайне редко.

Ранее в работе Довгалюк и др. (2018) был сделан предварительный анализ указанного случая, выполненный с помощью модели малой размерности, разработанной в ГГО (Довгалюк и др., 2013) с целью изучения роли гетерогенного замерзания облачных капель в процессах образования осадков (включая град) и упорядоченной электризации облака. Помимо этого, исследовалось влияние электрических сил на осадкообразование.

Рассчитывались и сравнивались между собой два случая: без учета (А) и с учетом (Б) гетерогенного замерзания облачных капель. Показано, что в случае Б осадкообразование и электризация происходят более интенсивно, чем в случае А. Изучено влияние электрических процессов на осадкообразование, с которым связано возникновение опасных явлений погоды (ливень, град). Показано, что как в случае А, так и в случае Б электрические процессы способствуют уменьшению интенсивности и количества осадков (дождя и града в отдельности, а также их суммы). Это вызвано влиянием электрического поля на скорость седиментации дождевых капель и градин, а также на движение воздуха, содержащего электрические заряды.

В данной работе продолжено исследование указанного грозо-градового процесса с помощью численной нестационарной трехмерной модели, разработанной в ГГО с участием ЦАО (Веремей и др., 2016).

Динамика конвективных движений и осадкообразования

Численная нестационарная трехмерная модель конвективного облака, используемая в работе, содержит полную систему уравнений

гидродинамики сжимаемой среды в форме Навье—Стокса. Микрофизические процессы описываются в параметрическом виде. Учитывается наличие воды в облаке во всех трех агрегатных состояниях (пар, вода, лед).

Микрофизический блок модели в целом аналогичен полуторамерной (Довгалюк и др., 2018), включая новые изменения (учет гетерогенного замерзания облачных капель и испарения облачных кристаллов). Однако имеется ряд особенностей. Была доработана параметризация распределения градин по размерам в части уточнения параметров функции Маршалла—Пальмера. При расчете содержания облачных капель было решено использовать равновесное приближение, в отличие от неравновесного подхода, используемого в полуторамерной модели.

С помощью трехмерной модели выполнены расчеты пространственно-временного изменения основных характеристик облака и осадков. По аналогии с работой Довгалюк и др. (2018) выполнены расчеты для случаев без учета (А) и с учетом (Б) гетерогенного замерзания облачных капель.

В качестве входных данных в модели используются вертикальные профили температуры, влажности и вектора скорости ветра, получаемые из данных радиозондирования атмосферы.

Данные зондирования по станции Воейково (26063) для исследуемого случая приведены в таблице 1. В отличие от полуторамерной модели, здесь взяты не прогностические, а фактические данные радиозондирования для момента 12 ч UTC (15 ч МСК), что близко к периоду максимального развития облачной конвекции.

Анализ данных радиозондирования показал, что в этот день слой конвективной неустойчивости (с двумя небольшими разрывами) располагался приблизительно от 910 до 640 ГПа. Далее следовали устойчивые слои до 540 ГПа, а выше этого уровня чередовались слои со слабой неустойчивостью и с безразличной стратификацией. Начиная с уровня 430 ГПа, наблюдался сплошной устойчивый слой. Суммарный дефицит точки росы на уровнях 850, 700 и 500 ГПа, часто используемый в качестве критерия возможности развития

конвективных облаков, составлял около 14,5 °С, что свидетельствовало о возможности развития Сб.

Таблица 1

**Вертикальные профили температуры (T) и влажности (T_d).
Станция Воейково (26063), 22.07.2017 г., 12 ч UTC**

| Давление, гПа | T , °С | T_d , °С | Давление, гПа | T , °С | T_d , °С |
|------------------|----------|------------|------------------|----------|------------|
| 1009 | 20,0 | 12,2 | 484 | -24,9 | -29,7 |
| 1000 | 18,8 | 11,8 | 436 | -30,5 | -36,0 |
| 960 | 15,2 | 6,4 | 400 | -35,1 | -41,1 |
| 925 | 12,9 | 6,0 | 363 | -40,4 | -46,8 |
| 850 | 5,6 | -0,4 | 341 | -43,8 | -50,5 |
| 827 | 4,6 | -0,4 | 320 | -47,3 | -54,5 |
| 764 | -1,3 | -5,8 | 300 | -46,5 | -54,5 |
| 744 | -1,7 | -7,0 | 250 | -42,7 | -54,7 |
| 700 | -5,9 | -9,8 | 229 | -41,7 | -54,7 |
| 632 | -10,9 | -13,8 | 200 | -42,7 | -58,7 |
| 611 | -12,4 | -15,8 | 164 | -45,3 | -62,7 |
| 578 | -14,9 | -19,1 | 150 | -46,5 | -64,5 |
| 544 | -17,7 | -22,7 | 125 | -47,4 | -65,0 |
| 500 | -23,1 | -27,8 | 100 | -48,5 | -65,5 |

В таблице 2 приведены полученные по результатам расчетов максимумы основных характеристик облака и осадков, а также аналогичные величины, полученные с помощью модели малой размерности (Довгалюк и др., 2018). Из таблицы видно, что отсутствие осреднения по координатам в трехмерной модели заметно повышает максимумы всех физических величин по сравнению

с результатами расчетов по полуторамерной модели. Так, высота верхней границы облака достигает 11,5—11,6 км (в полуторамерной модели — 9,0 км).

Таблица 2

Максимальные значения основных характеристик облака и осадков по результатам расчетов по полуторамерной (Довгалюк и др., 2018) и трехмерной моделям

| Параметр облака | Модель | | | |
|---|----------------|------|------------|-------|
| | полуторамерная | | трехмерная | |
| | А | Б | А | Б |
| Высота верхней границы облака ($H_{вр}$), км | 9,0 | 9,0 | 11,5 | 11,6 |
| Скорость восходящего потока (w), м/с | 15,0 | 15,0 | 37,6 | 38,0 |
| Водность облачных капель (Q_c), г/м ³ | 1,8 | 1,8 | 3,2 | 3,7 |
| Водность дождевых капель (Q_r), г/м ³ | 0,9 | 1,3 | 12,7 | 12,8 |
| Ледность градин (Q_i), г/м ³ | 1,7 | 2,2 | 13,9 | 13,8 |
| Ледность облачных кристаллов (Q_{ic}), г/м ³ | 0,8 | 1,2 | 1,5 | 1,7 |
| Интенсивность дождя у подстилающей поверхности, мм/ч | 9,8 | 15,0 | 350,6 | 354,7 |
| Интенсивность града у подстилающей поверхности, мм/ч | 4,4 | 9,4 | 350,8 | 375,1 |
| Радиолокационная отражаемость, дБZ | 65,9 | 67,7 | 72,5 | 72,5 |

Максимальная интенсивность дождя и града у подстилающей поверхности равна 354 и 375 мм/ч соответственно (отметим, что столь большие значения интенсивности осадков являются пиковыми как в пространстве, так и во времени). При этом по полуторамерной модели они не превосходят 15 и 10 мм/ч соответственно. Отметим, что по обеим моделям дождь и град начинают выпадать на подстилающую поверхность практически одновременно.

При сравнении случаев А и Б для трехмерной модели в целом выявлена та же закономерность, что и в работе Довгалюк и др. (2018) — усиление образования и выпадения осадков. Это объясняется тем, что в случае Б происходит усиленное льдообразование в области сравнительно высоких температур (полагается, что гетерогенное замерзание облачных капель начинается при температуре ниже -10 °С). Это способствует замораживанию дождевых капель за счет коагуляции с кристаллами. Происходит каскадное замерзание облака, на которое указывалось, в частности, в работе (Lawson et al., 2015). Таким образом, образуется большое количество градин, которые вследствие коагуляции как с облачными, так и с дождевыми каплями быстро растут и выпадают на подстилающую поверхность. В случае Б максимальная интенсивность дождя и града у подстилающей поверхности составляет 354,7 и 375,1 мм/ч (против 350,6 и 350,8 мм/ч в случае А).

Однако различие указанных случаев в части динамических и микрофизических параметров облака (кроме содержания облачных кристаллов) выражено существенно меньше (рис. 1, 2). Особенно слабо просматривается различие максимумов интенсивности осадков. Связано это с тем, что при учете трехмерности различия между случаями могут проявляться на расстоянии от места расположения максимума той или иной величины.

На рис. 3 приведены изоповерхности суммы водности облачных капель и ледности облачных кристаллов, а также водности дождевых капель и ледность градин. Видна существенная несимметричность формы облака и зоны осадков, связанная с учетом поля ветра.

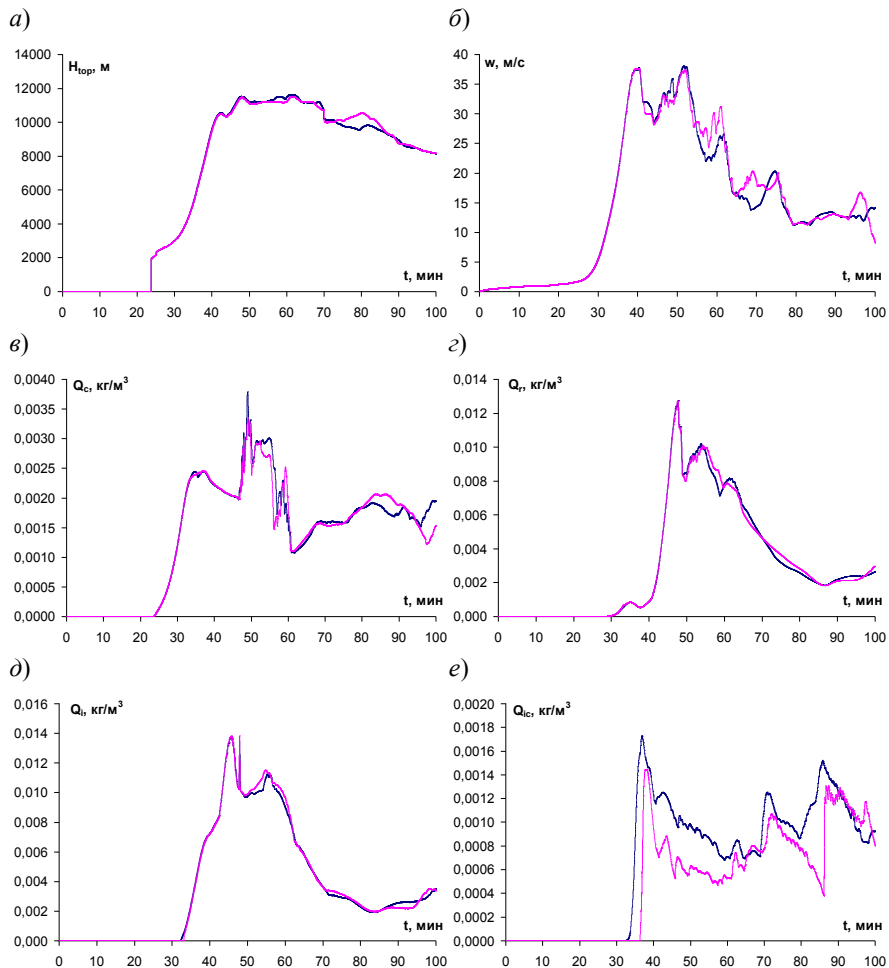


Рис. 1. Временной ход высоты верхней границы облака (а), максимального по высоте значения скорости восходящего потока (б), водности облачных капель (в), водности дождевых капель (г), ледности ледяных частиц осадков (д), ледности кристаллов (е). Красная и синяя кривые — случаи А и Б соответственно.

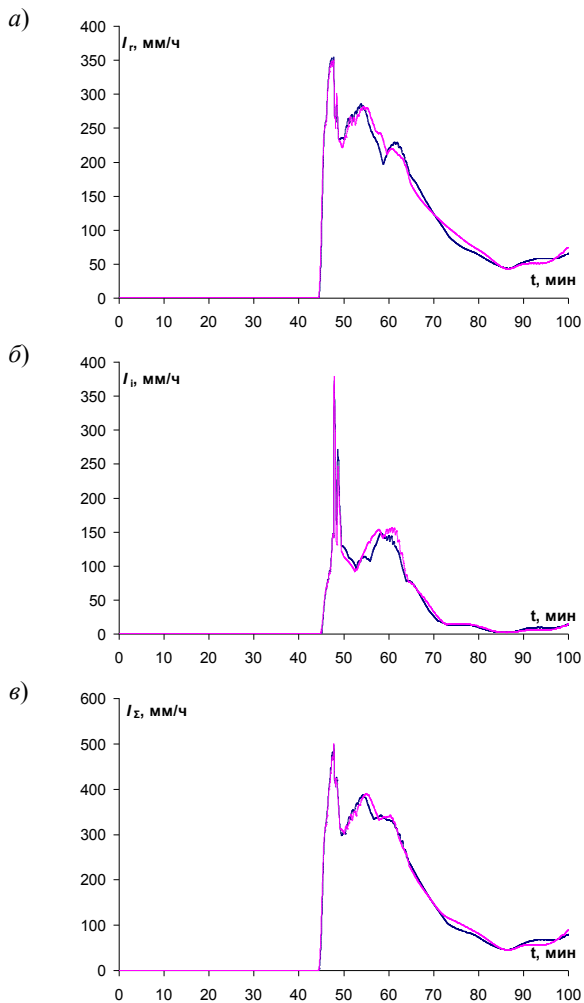


Рис. 2. Временной ход интенсивности осадков у подстилающей поверхности:
a — дождь, *б* — град, *в* — сумма дождя и града.
 Красная и синия кривые — случаи А и Б соответственно.

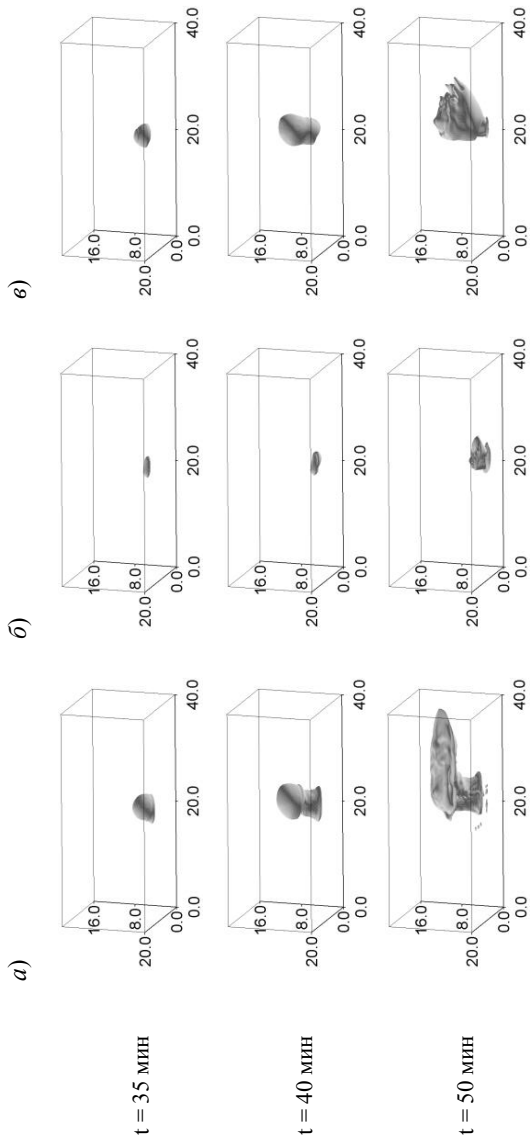


Рис. 3. Случай Б. Трехмерный вид изоповерхностей ($0,1 \text{ г/м}^3$) содержания разных фракций:
 а) сумма водности облачных капель и ледности облачных кристаллов,
 б) водность дождевых капель,
 в) ледность градин.

Изменение электрической структуры облака в ходе его эволюции

Динамические, микрофизические и электрические процессы в облаке взаимосвязаны между собой посредством как прямых, так и обратных связей. Распределение зарядов и полей неразрывно связано с динамикой конвективных потоков, образованием и выпадением осадков, фазовым составом облака и пространственным распределением частиц разных фракций.

Рассмотрим эволюцию электрических характеристик облака, полученную по данным численного моделирования.

На рис. 4 приведен временной ход пространственного максимума объемной плотности электрического заряда и напряженности электрического поля. Механизмы электризации облачных элементов в трехмерной модели — те же, что и в модели малой размерности (Довгалюк и др., 2018). Наиболее мощными из них являются разделение зарядов при столкновении облачных капель с тающими градинами или дождевыми каплями с последующим разлетом (поляризационный механизм) и при столкновении градин с облачными кристаллами. Однако пространственное распределение интенсивностей указанных процессов в силу трехмерности оказывается более сложным.

Если сравнивать с результатами расчетов по полуторамерной модели, видно, что промежуток времени между моментом возникновения первых облачных капель и началом заметного увеличения электрических характеристик по обеим моделям оказывается близким (около 15 мин). Однако частота разрядов в трехмерной модели оказывается существенно большей. Из рис. 4б также видно, что некоторые пики превосходят величину $2,5 \cdot 10^5$ В/м, так как иногда поле успевает превзойти пороговое значение всего лишь в течение одного шага по времени.

Сравним особенности динамики электрической структуры облака для случаев А и Б. В случае Б частота разрядов оказывается заметно выше, что подтверждает роль льдообразования в процессе электризации облака.

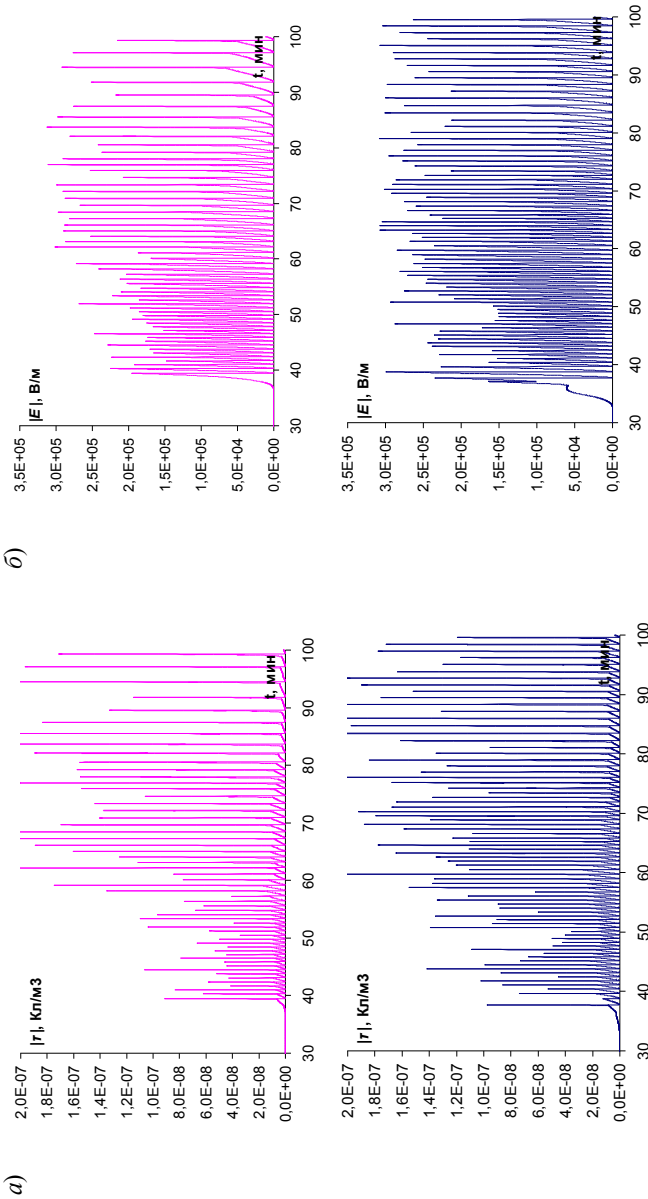


Рис. 4. Временной ход максимального по высоте значения модуля объемной плотности электрического заряда (a) и модуля напряженности электрического поля (б).

Красная и синяя кривые (на отдельных графиках) — случаи А и Б соответственно.

Большой интерес представляют результаты моделирования распределения зарядов в облаке.

На рис. 5 приведены вертикальные разрезы профиля объемной плотности электрического заряда и вертикальной составляющей напряженности электрического поля для случаев А и Б. Плоскость разреза выбрана приблизительно совпадающей с вертикальной осью облака. Здесь же для наглядности приведен вертикальный разрез профиля содержания облачных капель и ледяных кристаллов (облако, за исключением осадков). Рассматриваются моменты времени, предшествующие первому молниевому разряду на несколько минут. Из рисунков видно, что учет гетерогенного замерзания облачных капель приводит к инвертированию зарядовой структуры облака. Именно такой эффект был ранее выявлен экспериментально (Rawar et al., 2014) и подтвержден нами с помощью полуторамерной модели (Веремей и др., 2015) для случая, когда в облаке идет усиленное льдообразование вследствие сильного аэрозольного загрязнения атмосферы. С помощью трехмерной модели данный эффект получен нами впервые. В дальнейшем зарядовая структура облака переходит в трехполюсную.

Инвертирование полярности объясняется тем, что при наличии большого количества облачных ледяных кристаллов в сравнительно низком слое облака (хотя и в области отрицательных температур) происходят частые столкновения этих кристаллов с присутствующими там же градинами. При этом работает механизм электризации «лед—лед», который не является поляризационным, поэтому знак разделяемого заряда не зависит от направления внешнего электрического поля. Облачные кристаллы заряжаются отрицательно и поднимаются вверх восходящими потоками воздуха. Напротив, поляризационный механизм, обуславливающий обычную полярность облака, протекает слабо, так как запас облачных капель уменьшается вследствие их замерзания.

Сделаны попытки исследования влияния электрических сил на динамические и микрофизические процессы в облаке, в частности, на формирование опасных явлений погоды (ливни, грозы, град).

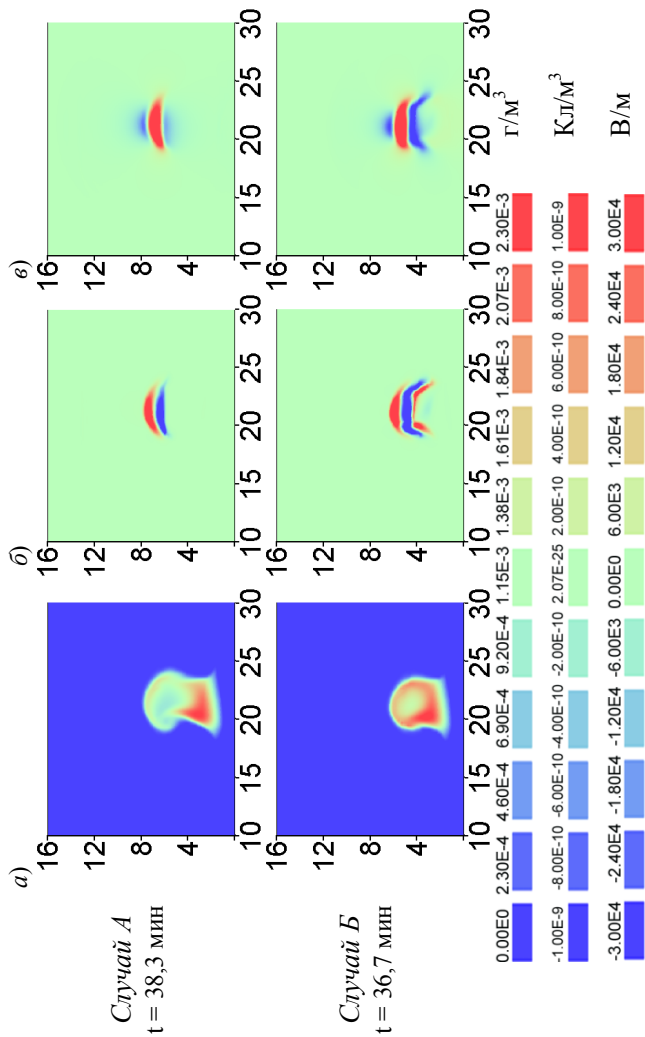


Рис. 5. Вертикальный разрез профилей суммарной волности облачных капель и ледности кристаллов (а), объемной плотности электрического заряда (б) и вертикальной составляющей вектора напряженности электрического поля (в) в плоскости XZ ($Y = 10$ км).

В модели учтены действие электростатической силы на ионизированную воздушную среду и взвешенные в ней заряженные частицы, а также влияние коронного разряда на замерзание капель.

Расчеты показали, что указанные процессы слабо влияют на характеристики облака. Данное влияние оказывается еще меньшим, чем по полуторамерной модели. Это связано с тем, что области больших зарядов и полей в трехмерном виде являются локальными и могут быть частично разнесены в пространстве с областями большой концентрации облачных элементов. В полуторамерной же модели все эти области совпадают и распространяются на все сечение облака за счет осреднения по координате.

Таким образом, в обеих моделях параметризация влияния электрических факторов на фазовые и микроструктурные процессы нуждается в дальнейшей доработке. Это позволит лучше оценить роль электричества в формировании опасных явлений. В модели также дополнительно планируется включить учет размножения ледяных кристаллов в облаке, а также влияние электричества на автоконверсию облачных капель. Результаты этих исследований будут опубликованы в дальнейшем.

Заключение

Численная нестационарная трехмерная модель облачной конвекции, разработанная в ГГО, была доработана в части описания микрофизических процессов. Учтено гетерогенное замерзание облачных капель с переходом в облачные ледяные кристаллы (ранее этот механизм учитывался только для капель осадков), а также испарение кристаллов. При расчете содержания облачных капель стало использоваться равновесное приближение (в отличие от применявшегося ранее неравновесного подхода). Также были уточнены параметры функции распределения градин по размерам.

Выполнен анализ результатов численного моделирования грозоградового облака. В качестве примера выбран случай сильного градобития, наблюдавшегося в Санкт-Петербурге 22 июля 2017 года.

Рассчитывались и сравнивались между собой два случая: без учета (А) и с учетом (Б) гетерогенного замерзания облачных капель.

В случае Б происходило более сильное образование и выпадение осадков по сравнению со случаем А. Однако различие между этими случаями в части максимумов водности, ледности (кроме ледности кристаллов) и интенсивности осадков оказалось незначительным. Тем не менее, в случае Б наблюдается более интенсивная электризация облака и разделение зарядов. В результате заметно увеличивается (в 2—3 раза) частота молний по сравнению со случаем А.

Расчеты, впервые выполненные авторами с помощью трехмерной модели показали, что в случае Б полярность облака инвертируется (отрицательный заряд вверху, положительный внизу), в то время, как в случае А полярность обычная (положительный заряд вверху, отрицательный внизу).

Установлено, что воздействие электрических сил на динамические и микрофизические процессы в облаке слабо влияет на возникновение опасных явлений погоды (ливень, град). Следовательно, в трехмерной модели необходимы доработки, позволяющие в более полной мере оценить этот эффект.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 17-05-00965_a, БРИКС_m 18-55-80020).

Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М. В. Ломоносова (Воеводин и др., 2012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ацабоков Б. А., Шаповалов А. В., Гаева З. С., Новикова Л. Д., Шаповалов В. А., Машуков И. Х., Шериева М. М. (2016). Численное моделирование параметров градовых облаков при воздействии кристаллизующим реагентом. Перспективы развития полной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. Вып. 582. С. 174—183.

Белова Л. К., Дрофа А. С. (2016). Исследование воздействия гигроскопическими реагентами на конвективное облако по результатам численного моделирования // Труды ГГО. Вып. 582. С. 184—201.

Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Гопалакришнан В., Комаровских К. Ф., Муругавел П., Павар С. Д., Синькевич А. А. (2015). Исследование влияния сильного аэрозольного загрязнения атмосферы на динамику электрической структуры кучево-дождевого облака методом численного моделирования // *Метеорология и гидрология*. № 12. С. 5—18.

Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С. (2016). Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // *Труды ГГО*. Вып. 582. С. 45—91.

Владимиров С. А., Пастушков Р. С. (2016). Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трехмерное численное моделирование // *Труды ГГО*. Вып. 582. С. 116—127.

Воеводин Вл. В., Жуматий С. А., Соболев С. И., Антонов А. С., Брызгалов П. А., Никитенко Д. А., Стефанов К. С., Воеводин Вад. В. (2012). Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // *Открытые системы*. — М.: Издательский дом «Открытые системы». 7 с.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. (2013). Применение полугорамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. — СПб: Моби Дик. 220 с.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Попов В. Б. (2018). Численное моделирование эволюции грозо-градового конвективного облака, его электрической структуры и связанных с ним опасных явлений на северо-западе России // *Труды ГГО*. Вып. 590. С. 7—26.

Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И. (1984). Численное моделирование облаков. — М.: Гидрометеиздат. 185 с.

Lawson R. P., Woods S., Morrison H. (2015). The Microphysics of Ice and Precipitation Development in Tropical Cumulus Clouds // *Journal of the Atmospheric Science*. V. 72. P. 2429—2445. DOI: 10.1175/JAS-D-14-0274.1.

Pawar S. D., Gopalakrishnan V., Murugavel P., Sinkevich A., Deen Mani La (2014). Effects of environmental conditions on inducing charge structures of thunderstorms over Eastern India. // *Earth, Planets and Space*. V. 66, № 54, P. 2—14. doi:10.1186/1880-5981-66-54.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОБЛАЧНЫХ ЗАРЯДОВЫХ СТРУКТУР С ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРОВОДЯЩЕЙ АТМОСФЕРОЙ С НЕОДНОРОДНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

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 12.02.2019
Поступила после доработки 22.03.2019

1 Введение

Решение задачи о распределении электрического поля, создаваемого электрическими зарядами, генерируемыми в облаке, в атмосфере с неоднородной электрической проводимостью необходимо для интерпретации экспериментальных данных по измерению электрических полей в наземных, самолетных и зондовых экспериментах, проводимых вне облака или облачной системы. С физической точки зрения неоднородность электрической проводимости по вертикали при наличии вертикального электрического поля приводит к появлению дополнительного электрического заряда, вызванного поляризацией атмосферы. Измеряемый электрический заряд облака поэтому экранируется этим поляризационным зарядом и возникает задача учета электрического поля, создаваемого этим поляризационным зарядом. В ряде случаев электрическая проводимость в облаках сильно понижена (Phillips, 1967; Tzur, Roble, 1985), что вызвано присутствием облачных частиц, которые поглощают атмосферные ионы. Наличие относительно резкой границы облако — свободная атмосфера приводит к резкому скачку электрической проводимости на этой границе и в стационарном случае к скачку напряженности электрического поля.

Стационарная задача о распределении электрического поля, создаваемого точечными зарядовыми источниками в атмосфере с экспоненциальной электрической проводимостью впервые была рассмотрена в работе (Holser, Saxon, 1952), а затем в работах (Kasemir, 1959; Michnowski, 1973). В этих работах было получено аналитическое решение задачи. Дипольный зарядовый точечный источник поддерживался сторонним электрическим током, который определяется процессами электризации в облаке.

Нестационарный вариант задачи, который представляет наибольший интерес для практических целей, не имеет простого решения. Численный алгоритм решения уравнения:

$$\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \Delta\varphi + \nabla(\lambda \nabla\varphi) = S \quad (1.1)$$

где φ — потенциал электрического поля,

S — функция источника, определяемая процессами электризации в облаке,

λ — электрическая проводимость атмосферы, которая представляется в следующем виде:

$$\lambda = \lambda_0 e^{\alpha z} \quad (1.2)$$

рассматривались для сферической атмосферы в работе (Browning et al., 1987), а в плоском случае — в работах (Hager et al., 1989; Illingworth, 1972). Приближенный аналитический метод решения задачи при включении функции источника S в момент времени $t = 0$ использовался в работе (Michnowski, 1973). Также в работе (Mann, 1970) сделана попытка получить аналитическое решение нестационарной задачи, но здесь решение не доведено до конца.

В настоящем разделе вначале рассматривается обобщение стационарной задачи на случай, когда точечный зарядовый источник находится в облачной среде со скачком электрической проводимости на верхней и нижней границах. Затем эта задача решается с учетом пространственного распределения зарядового источника в предположении его цилиндрической симметрии.

Нестационарная задача формулируется в общем виде на основе системы уравнений Максвелла. Уравнение (1.1) следует из полученной системы при $c \rightarrow \infty$, что означает пренебрежение волновыми процессами. В этой части раздела отчета получено решение задачи о включении в некоторый момент времени токового источника, исследуется гармоническая задача при колебаниях токового источника во времени, рассматривается плоская переходная задача. Электрическая проводимость здесь также задается вначале в виде (1.2), затем учитываются скачки электрической проводимости на границах плоскопараллельного облака.

2 Распределение электрического поля, создаваемого стационарным токовым источником в атмосфере с неоднородной электрической проводимостью

2.1 Электрическое поле стационарного токового источника, находящегося в плоскопараллельной среде со скачками электрической проводимости на ее границах

Стационарное уравнение, используемое для решения данной задачи, следует из уравнения (1.1), если положить $\partial/\partial t = 0$:

$$\nabla(\lambda \nabla \varphi) = -I_1 \delta(\vec{r} - \vec{r}_1) = \text{div } \vec{j}_{\text{ст}} \quad (2.1)$$

где I_1 — сторонний электрический ток, которому соответствует электрический заряд $q = I_1 \frac{1}{4\pi\lambda(\vec{r}_1)}$, $\delta(\vec{r} - \vec{r}_1)$ — функция Дирака.

В уравнении (2.1) не учитывается второй заряд в дипольном представлении $q_1 = -I_1 / 4\pi\lambda(\vec{r}_0)$, но он может быть учтен, исходя из принципа линейной суперпозиции. Уравнение (2.1) справедливо и в так называемом «квазистационарном случае», когда I_1 есть функция времени, но характерный временной масштаб изменения которой $T \gg \tau_\lambda$, где $\tau_\lambda = (4\pi\lambda)^{-1}$ — время электрической релаксации атмосферы.

Будем предполагать, что точечный зарядовый источник находится в плоскопараллельном слое облачной среды конечной толщины.

Представим электрическую проводимость атмосферы в следующем виде:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{\alpha z}, & z > H \\ \bar{\lambda}, & h \leq z \leq H \\ \lambda_0 e^{\alpha z}, & 0 \leq z < h \end{cases} \quad (2.2)$$

где H, h — верхняя и нижняя границы слоя, $\bar{\lambda} = \text{const}$.

С учетом (2.2) вместо уравнения (2.1) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_1 + \alpha \frac{\partial\varphi_1}{\partial z} &= 0, & 0 \leq z < h \\ \Delta\varphi_3 + \alpha \frac{\partial\varphi_3}{\partial z} &= 0, & z > H \\ \Delta\varphi_2 &= -4\pi q \delta(\vec{r} - \vec{r}_0), & h \leq z \leq H \end{aligned} \quad (2.3)$$

Вторые члены в первых двух уравнениях системы (2.3) определяют плотность поляризационного электрического заряда, вызванного градиентом электрической проводимости λ . При $\alpha = 0$ эти члены обращаются в нуль. Граничные условия для решения системы уравнений (2.3) представляются в виде:

$$\begin{aligned} \varphi_1|_{z=0} &= 0, & \varphi_3|_{R \rightarrow \infty} &= 0 \\ \varphi_1(h) &= \varphi_2(h), & \varphi_2(H) &= \varphi_3(H) \\ \bar{\lambda} \frac{\partial\varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=h} &= \lambda(h) \frac{\partial\varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=h}, & \bar{\lambda} \frac{\partial\varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=H} &= \lambda(H) \frac{\partial\varphi_3}{\partial z} \Big|_{z=H} \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $R = \sqrt{\bar{x}^2 + y^2 + z^2}$.

Записывая систему уравнений (2.3) в цилиндрической системе координат (r, ϕ, z) с осью z , проходящей через источник и перпендикулярной горизонтальной земной поверхности, предполагая

задачу осесимметричной $\partial/\partial\phi = 0$ и применяя к полученным уравнениям преобразование Фурье—Бесселя (Диткин, Прудников, 1974):

$$\bar{\varphi} = \int_0^\infty \varphi(r, z) J_0(xr) r dr, \quad \varphi = \int_0^\infty \bar{\varphi}(z, x) J_0(xr) x dx \quad (2.5)$$

получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{\varphi}_1}{dz^2} + \alpha \frac{d \bar{\varphi}_1}{dz} - x^2 \bar{\varphi}_1 &= 0, & 0 \leq z < h \\ \frac{d^2 \bar{\varphi}_2}{dz^2} - x^2 \bar{\varphi}_2 &= -2q\delta(z - z_0), & h \leq z \leq H \\ \frac{d^2 \bar{\varphi}_3}{dz^2} + \alpha \frac{d \bar{\varphi}_3}{dz} - x^2 \bar{\varphi}_3 &= 0, & z > H \end{aligned} \quad (2.6)$$

где $J_0(xr)$ (2.6) функция Бесселя нулевого порядка.

Граничные условия при этом не меняются. Решение в области $h \leq z \leq H$ записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_2 &= C_5 e^{xz} + C_6 e^{-xz} + \frac{q}{x} (e^{-x(z-z_0)} - e^{x(z-z_0)}), & z_0 \leq z \leq H \\ \bar{\varphi}'_2 &= C_5 e^{xz} + C_6 e^{-xz}, & h \leq z < z_0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

а в областях $0 \leq z \leq h$, $z > H$:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1 &= C_3 e^{\lambda_1 z} + C_4 e^{\lambda_2 z}, & 0 \leq z < h \\ \bar{\varphi}_3 &= C_1 e^{\lambda_1 z} + C_2 e^{\lambda_2 z}, & z > H \end{aligned} \quad (2.8)$$

где $\lambda_1 = -(\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 4x^2})/2$, $\lambda_2 = -(\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4x^2})/2$, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ — постоянные.

Используя первые два граничные условия в (2.4), получим:

$$C_3 + C_4 = 0, \quad C_1 = 0 \quad (2.9)$$

Для определения постоянных C_2, C_3, C_5, C_6 воспользуемся оставшимися граничными условиями. В результате получим систему

уравнений, из которой при $\eta(h) \ll 1, \eta(H) \ll 1$ ($\eta(h) = \bar{\lambda}/\lambda(h), \eta(H) = \bar{\lambda}/\lambda(H)$) следуют выражения для C_2 и C_3 :

$$\begin{aligned} C_2 &= -\frac{2q \eta(H)}{\lambda_2 e^{\lambda_2 H}} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} \\ C_3 &= -\frac{2q \eta(h)}{\lambda_1 e^{\lambda_1 h} - \lambda_2 e^{\lambda_2 h}} \frac{\operatorname{sh}x(H - z_0)}{\operatorname{sh}x(H - h)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Выражения для постоянных C_5 и C_6 здесь не выписываются, так как рассматривается электрическое поле при $z > H, 0 \leq z < h$.

Переходя от образов преобразования Фурье-Бесселя к оригиналам, получим с помощью (2.5) следующие выражения для потенциала электрического поля в указанных областях:

$$\begin{aligned} \varphi_3 &= -2q \eta(H) \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda_2} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} e^{\lambda_2(z-H)} J_0(xr) x dx, \quad z > H \\ \varphi_1 &= 2q \eta(h) \int_0^{\infty} \frac{e^{\lambda_1 z} - e^{\lambda_2 z}}{\lambda_1 e^{\lambda_1 z} - \lambda_2 e^{\lambda_2 z}} \frac{\operatorname{sh}x(H - z_0)}{\operatorname{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx, \\ &\quad 0 \leq z < h \end{aligned} \quad (2.11)$$

Рассмотрим область $z > H$. Используя выражение для φ_3 при $z > H$ в (2.11), получим для вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности электрического поля выражения:

$$\begin{aligned} E_{3z} &= -\frac{\partial \varphi_3}{\partial z} = 2q \eta(H) \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} e^{\lambda_2(z-H)} J_0(xr) x dx, \\ E_{3r} &= -\frac{\partial \varphi_3}{\partial r} = 4q \eta(H) \int_0^{\infty} \frac{e^{\lambda_2(z-H)}}{(\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4x^2})_1} J_1(xr) x^2 dx \end{aligned} \quad (2.12)$$

Рассмотрим расстояния $r \gg \alpha^{-1}$, что соответствует условию $x/\alpha \ll 1$ в подынтегральных выражениях (2.12). Используя это условие, имеем:

$$E_{3z} = 2q \eta(H) e^{-\alpha(z-H)} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx \quad (2.13)$$

$$E_{3r} = \frac{2q \eta(H)}{\alpha} e^{-\alpha(z-H)} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} J_1(xr) x^2 dx$$

Для вычисления интегралов, стоящих в правых частях выражений (2.13), можно использовать следующее разложение (Градштейн, Рыжик, 1971):

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} J_\nu(xr) x^{\nu+1} dx = \\ & = \frac{2}{H - h} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\pi n}{H - h} \right)^{\nu+1} (-1)^{h+1} \sin \frac{\pi n(z_0 - h)}{H - h} \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $K_\nu(y)$ — функция Макдональда, $\nu = 0, 1$.

Это разложение быстро сходится при $r > H - h$ и с учетом первых членов разложения получим для составляющих E_{3z} и E_{3r} :

$$\begin{aligned} E_{3z} & \approx \frac{4\pi q \eta(H)}{(H - h)^2} \sin \frac{\pi(z_0 - h)}{H - h} e^{-\alpha(z-H)} \left(\frac{H - h}{r} \right)^{1/2} e^{-\pi r / (H - h)} \\ E_{3r} & \approx \frac{4\pi^2 q \eta(H)}{\alpha(H - h)^3} \sin \frac{\pi(z_0 - h)}{H - h} e^{-\alpha(z-H)} \left(\frac{H - h}{r} \right)^{1/2} e^{-\pi r / (H - h)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Интересно отметить, что отношение этих составляющих равно:

$$\frac{E_{3z}}{E_{3r}} = \frac{\alpha(H - h)}{\pi} \quad (2.16)$$

Из (2.16) следует, что при $\alpha(H - h) < 1$ на больших расстояниях преобладает горизонтальная составляющая напряженности электрического поля, а при $\alpha(H - h) > \pi$ — вертикальная составляющая. Для расстояния $r \ll \alpha^{-1}$, что соответствует условию $x/\alpha \gg 1$, имеем:

$$E_{3r} = 2q \eta(H) \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} e^{-x(z-H)} J_1(xr) x dx$$

$$E_{3z} = 2q \eta(H) \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} e^{-x(z-H)} J_0(xr) x dx$$
(2.17)

Для вычисления интегралов в (2.17) представим функцию $e^{-x(z-H)} \frac{\operatorname{sh}x(z_0-h)}{\operatorname{sh}x(H-h)}$ в виде следующего разложения:

$$e^{-x(z-H)} \frac{\operatorname{sh}x(z_0 - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} =$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ e^{-x[z-z_0+2h(H-h)]} e^{-x[z+z_0-2h+2h(H-h)]} \right\}$$
(2.18)

Подставляя (2.18) в (2.17) и интегрируя почленно, получим:

$$E_{3z} = 2q \eta(H) \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{2n(H - h) + z - z_0}{[(2n(H - h) + z - z_0)^2 + r^2]^{3/2}} - \frac{2n(H - h) + z - z_0 - 2h}{[(2n(H - h) + z + z_0 - 2h)^2 + r^2]^{3/2}} \right\}$$

$$E_{3r} = 2q \eta(H) \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{r}{[(2n(H - h) + z - z_0)^2 + r^2]^{3/2}} - \frac{r}{[(2n(H - h) + z + z_0 - 2h)^2 + r^2]^{3/2}} \right\}$$
(2.19)

При $z < h$ вертикальная и горизонтальная составляющая напряженности электрического поля определяются выражениями:

$$E_z = -2q \eta(h) \int_0^{\infty} \frac{\lambda_1 e^{\lambda_1 z} - \lambda_2 e^{\lambda_2 z}}{\lambda_1 e^{\lambda_1 h} - \lambda_2 e^{\lambda_2 h}} \frac{\operatorname{sh}x(H - z_0)}{\operatorname{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx$$

$$E_r = 2q \eta(h) \int_0^{\infty} \frac{e^{\lambda_1 z} - e^{\lambda_2 z}}{e^{\lambda_1 h} - e^{\lambda_2 h}} \frac{\operatorname{sh}x(H - z_0)}{\operatorname{sh}x(H - h)} J_1(xr) x^2 dx \quad (2.20)$$

При $z = 0$ $E_r = 0$, а для E_z имеем:

$$E_z = -2q \eta(h) \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}}{\lambda_1 e^{\lambda_1 h} - \lambda_2 e^{\lambda_2 h}} \frac{\operatorname{sh}x(H - z_0)}{\operatorname{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx \quad (2.21)$$

При $r \gg \alpha^{-1}$:

$$E_z = -2q \eta(h) e^{\alpha h} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{sh}x(H - z_0)}{\operatorname{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx \quad (2.22)$$

Интеграл в выражении (2.22) вычисляется как и в (2.13) и с учетом первого члена разложения получим для $E_z|_{z=0}$:

$$E_z|_{z=0} = -\frac{4\pi q \eta(h)}{(H - h)^2} e^{\alpha h} \sin \frac{\pi(H - z_0)}{H - h} \left(\frac{H - h}{r} \right)^{1/2} e^{-\pi r / (H - h)} \quad (2.23)$$

Рассмотренное выше решение можно обобщить, если представить электрическую проводимость в следующем виде:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{\alpha z}, & z > H, \quad 0 \leq z < h \\ \eta e^{\alpha_1 z} \lambda_0, & h \leq z \leq H \end{cases} \quad (2.24)$$

В этом случае второе уравнение в системе (2.6) заменяется на:

$$\frac{d^2\bar{\varphi}_2}{dz^2} + \alpha_1 \frac{d\bar{\varphi}_2}{dz} - x^2\bar{\varphi}_2 = -2q\delta(z - z_0), \quad h \leq z \leq H \quad (2.25)$$

Решение этого уравнения представляется в следующем виде:

$$\bar{\varphi}_2 = C_5 e^{\bar{\lambda}_1 z} + C_6 e^{\bar{\lambda}_2 z} + \frac{2q}{\sqrt{\alpha_1^2 + 4x^2}} [e^{\bar{\lambda}_2(z-z_0)} - e^{\bar{\lambda}_1(z-z_0)}], \quad z_0 < z \leq H \quad (2.26)$$

$$\bar{\varphi}'_2 = C_5 e^{\bar{\lambda}_1 z} + C_6 e^{\bar{\lambda}_2 z}, \quad h \leq z < z_0$$

где $\bar{\lambda}_1 = (\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 + 4x^2})/2$,
 $\bar{\lambda}_2 = (\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 + 4x^2})/2$.

Постоянные $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ в данном случае будут определяться аналогичным образом. Здесь мы рассмотрим распределение поля при $z > H$. Полагая $\alpha = \alpha_1$ и $\eta \ll 1$, получим выражение для потенциала электрического поля при $z > H$:

$$\varphi = 2q\eta \int_0^\infty \frac{1}{\lambda_2} \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}(z_0-h)\left(\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}-1\right)} - e^{\frac{\alpha}{2}(z_0-h)\left(1+\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}\right)}}{e^{\frac{\alpha}{2}(H-h)\left(1+\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}\right)} - e^{\frac{\alpha}{2}(H-h)\left(1-\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}\right)}} \times \quad (2.27)$$

$$\times e^{\lambda_2(z-H)} J_0(xr) x dx$$

Для вертикальной составляющей напряженности электрического поля при $z > H$ имеем:

$$E_z = 2q\eta e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_0)} \times$$

$$\times \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_0)\left(\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}\right)} - e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_0-2h)\left(\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}\right)}}{1 - e^{-\alpha(H-h)\left(\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}\right)}} \times J_0(xr) x dx \quad (2.28)$$

Разлагая знаменатель подынтегрального выражения в (2.28) в ряд и интегрируя почленно, получим для E_z :

$$\begin{aligned}
 E_z = q \eta e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_0)} & \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{[z-z_0+n(H-h)]^2+r^2}} \times \right. \\
 & \times \frac{\alpha[z-z_0+n(H-h)]}{[z-z_0+n(H-h)]^2+r^2} \times \\
 & \times \left[1 + \frac{2}{\alpha\{[z-z_0+n(H-h)]^2+r^2\}^{1/2}} \right] - \\
 & - \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{[z+z_0-2h+n(H-h)]^2+r^2}} \times \\
 & \times \frac{\alpha[z+z_0-2h+n(H-h)]}{[z+z_0-2h+n(H-h)]^2+r^2} \times \\
 & \left. \times \left[1 + \frac{2}{\alpha\{[z+z_0-2h+n(H-h)]^2+r^2\}} \right] \right\} \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

Выражение (2.29) существенным образом отличается от выражения для напряженности электрического поля в вертикальном направлении для точечного источника, полученного в работе (Holser, Saxon, 1952), без учета скачка электрической проводимости. Отличие прежде всего проявляется в появлении множителя η , который отражает эффект экранирования поля электрического заряда источника, меняется и сама структура решения. При интерпретации самолетных измерений электрического поля для времен $t > \tau_\lambda$ это необходимо учитывать.

2.2 Распределение электрического поля, создаваемого токовым источником конечного радиуса

В рассмотренной выше задаче предполагается, что радиус токового источника является бесконечно малым. То же предположение содержится и в работе (Holser, Saxon, 1952). Пусть

сторонний ток течет в цилиндре конечного радиуса a в области $[z_0, z_1]$. Тогда плотность этого тока будет иметь представление:

$$\vec{j}_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{ст}}}{\pi a^2} [\theta(z - z_0) - \theta(z - z_1)] \vec{e}_z \quad (2.30)$$

где $\theta(z)$ — функция Хэвисайда.

Рассмотрим стационарную задачу о распределении электрического поля, создаваемого токовым источником (2.30) в окружающей атмосфере с электрической проводимостью (1.2). В этом случае имеем уравнение для потенциала электрического поля:

$$\Delta\varphi + \alpha \frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{1}{\lambda} \frac{dj_{\text{ст}}^z}{dz} = \frac{1}{\lambda} \frac{I_{\text{ст}}}{\pi a^2} [\delta(z - z_0) - \delta(z - z_1)] \quad (2.31)$$

Считая задачу симметричной по углу ϕ и применяя преобразование Фурье—Бесселя (2.5), получим уравнение для $\bar{\varphi}$:

$$\frac{d^2\bar{\varphi}}{dz^2} + \alpha \frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial z} - x^2\bar{\varphi} = \frac{I_{\text{ст}}}{\lambda \pi ax} J_1(ax) [\delta(z - z_0) - \delta(z - z_1)] \quad (2.32)$$

$$= \bar{S}$$

где $J_1(ax)$ — функция Бесселя 1-ого рода.

Общее решение уравнения (2.32) при граничных условиях:

$$\bar{\varphi}|_{z=0} = 0, \quad \bar{\varphi}|_{z \rightarrow \infty} = 0 \quad (2.33)$$

и записывается в следующем виде:

$$\bar{\varphi} = -\frac{I_{\text{ст}}}{\pi ax \lambda_0} \frac{J_1(ax)}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} [e^{-(\alpha + \lambda_1)z_0} - e^{-(\alpha + \lambda_1)z_1}] \times$$

$$\times (e^{\lambda_1 z} - e^{\lambda_2 z}), \quad z < z_0 \quad (2.34)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{I_{\text{ст}} J_1(ax) e^{\lambda_2 z}}{\pi ax \lambda_0 \sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} \times$$

$$\times (e^{-(\alpha + \lambda_1)z_0} - e^{-(\alpha + \lambda_1)z_1} - e^{-(\alpha + \lambda_2)z_0} - e^{-(\alpha + \lambda_2)z_1}), \quad z > z_1$$

Используя (2.34), получим для потенциала электрического поля при $z < z_0$ и $z > z_1$:

$$\begin{aligned} \varphi = & -\frac{I_{\text{ст}}}{\pi a \lambda_0} \int_0^{\infty} \frac{J_1(ax)}{x\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} \times \\ & \times \left\{ e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_0)} \left[e^{-\frac{\alpha}{2}|(z-z_0)|\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} - e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_0)\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} \right] - \right. \\ & \left. - e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_1)} \left[e^{-\frac{\alpha}{2}|(z_1-z)|\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} - e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_1)\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} \right] \right\} J_0(xr) x dx, \end{aligned} \quad (2.35)$$

$z < z_0, z > z_1$

При $ax \ll 1$, разлагая функцию $J_1(ax)$ в ряд, учитывая первый член разложения и интегрируя, получим решение задачи Хольцера—Саксона (Holser, Saxon, 1952). В случае произвольных a можно использовать разложение $J_1(ax)$ в ряд полностью:

$$\begin{aligned} J_1(ax) = & \frac{ax}{2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \left(\frac{ax}{2}\right)^{2m}}{m! (m+1)!} = \\ = & \frac{ax}{2} \left[1 - \frac{\left(\frac{ax}{2}\right)^2}{1 \cdot 2} + \frac{\left(\frac{ax}{2}\right)^4}{2! 3!} - \dots \dots \right] \end{aligned} \quad (2.36)$$

Рассмотрим в качестве примера вычисления первый интеграл в выражениях (2.35), в котором $p = \frac{\alpha}{2}(z - z_0)$:

$$\begin{aligned} \tilde{S} = & -\frac{I_{\text{ст}}}{2\pi \lambda_0 \alpha} e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_0)} \times \\ & \times \int_0^{\infty} \frac{e^{-p\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}}}{\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} J_0(xr) x dx \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \left(\frac{ax}{2}\right)^{2m}}{m! (m+1)!} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Произведем в интеграле (2.37) замену переменных: $y = xr$. Тогда получим:

$$\tilde{S} = -\frac{I_{\text{ст}} e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_0)}}{2\pi \lambda_0 a r^2} \times \int_0^{\infty} \left[1 - \frac{\left(\frac{a}{2r} y\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{a}{2r} y\right)^4}{2! 3!} - \dots \dots \right] \frac{e^{-p\sqrt{1+\frac{4y^2}{\alpha^2 r^2}}}}{\sqrt{1+\frac{4y^2}{\alpha^2 r^2}}} J_0(y) y dy \quad (2.38)$$

Вычисляя первый интеграл в разложении (2.38), получим член, соответствующий решению Хольцера—Саксона, учет последующих членов в разложениях при $a/r < 1$ дает поправки к этому решению. Вычислим второй член разложения порядка $a^2/8r^2$. Замена переменных во втором интеграле $u^2 = 1 + \frac{4y^2}{\alpha^2 r^2}$ приводит к двум интегралам:

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^{\infty} \frac{e^{-p\sqrt{1+\frac{4y^2}{\alpha^2 r^2}}}}{\sqrt{1+\frac{4y^2}{\alpha^2 r^2}}} J_0(y) y^3 dy = \\ &= \left(\frac{\alpha^2 r^2}{4}\right)^2 \left[\int_1^{\infty} e^{-pu} J_0\left[\frac{\alpha r}{2}(u^2 - 1)^{1/2}\right] u^2 du - \right. \\ &\quad \left. - \int_1^{\infty} e^{-pu} J_0\left[\frac{\alpha r}{2}(u^2 - 1)^{1/2}\right] du \right] \end{aligned} \quad (2.39)$$

Второй интеграл в (2.39) определяется выражением (Градштейн, Рыжик, 1971):

$$\int_1^{\infty} e^{-pu} J_0\left[\frac{\alpha r}{2}(u^2 - 1)^{1/2}\right] du = \frac{e^{-\sqrt{p^2 + \frac{\alpha^2 r^2}{4}}}}{\sqrt{p^2 + \frac{\alpha^2 r^2}{4}}} = I \quad (2.40)$$

Для нахождения первого интеграла в (2.39) продифференцируем (2.40) два раза по параметру p . В результате получим:

$$\frac{d^2 I}{dp^2} = \int_1^{\infty} e^{-pu} J_0 \left[\frac{\alpha r}{2} (u^2 - 1)^{1/2} \right] u^2 du \quad (2.41)$$

Таким же образом могут быть найдены и последующие члены разложения по $(a/2r)^{2k}$.

2.3 Распределение электрического поля, создаваемого токовым источником с неоднородным распределением по высоте и радиусу

Учтем в рассмотренной выше задаче неоднородность источника по высоте и радиусу. С этой целью, используя результаты работы (Tzur, Roble, 1985), запишем функцию источника S в уравнении (2.31) в следующем виде:

$$S = -4\pi \tau_0 e^{-az} N \left(\frac{Q_+}{\tau} e^{-\frac{(z-z_p)^2}{a^2}} + \frac{Q_-}{\tau} e^{-\frac{(z-z_n)^2}{a^2}} \right) e^{-\frac{r^2}{b^2}} \quad (2.42)$$

где N — постоянная нормировки, имеющая размерность L^{-3} , где L — характерный масштаб длины для источника, z_p, z_n — вертикальные расстояния от земной поверхности положительного и отрицательного зарядовых центров, r — радиус в цилиндрической системе координат, a и b — ширина зарядовых центров в направлениях z и r , τ — временная постоянная генерации зарядовых центров Q_+ и Q_- .

Преобразование Фурье—Бесселя от функции S представлено в виде выражения:

$$\bar{S} = -4\pi \tau_0 e^{-az} \left(A_+ e^{-\frac{(z-z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z-z_n)^2}{a^2}} \right) \frac{b^2}{2} e^{-\frac{b^2 x^2}{4}} \quad (2.43)$$

где $A_+ = N \frac{Q_+}{\tau}$, $A_- = N \frac{Q_-}{\tau}$.

При вычислении (2.43) использовался интеграл (Градштейн, Рыжик, 1971):

$$\int_0^{\infty} x^{\nu+1} e^{-\alpha x^2} J_{\nu}(\beta x) dx = \frac{\beta^{\nu}}{(2\alpha)^{\nu+1}} e^{-\frac{\beta^2}{4\alpha}} \quad (2.44)$$

Решение уравнения (2.32) при функции источника (2.43) и граничных условиях (2.33) записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi} = & -\frac{e^{\lambda_1 z}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} \int_z^{\infty} \bar{S} e^{-\lambda_1 z'} dz' + \\ & + \frac{e^{\lambda_2 z}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} \left(\int_0^{\infty} \bar{S} e^{-\lambda_2 z} dz - \int_0^z \bar{S} e^{-\lambda_2 z'} dz' \right) \end{aligned} \quad (2.45)$$

Используя (2.45), с помощью (2.5) получим для потенциала электрического поля φ :

$$\begin{aligned} \bar{\varphi} = & \int_0^{\infty} J_0(xr) \bar{\varphi} x dx = I_1 + I_2 + I_3 \\ I_1 = & \frac{2\pi\tau_0 b^2}{\alpha} \left\{ \int_z^{\infty} e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z')} \left[A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} \right] \times \right. \\ & \left. \times \int_0^{\infty} J_0(xr) x \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z')\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}}}{\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} e^{-\frac{b^2 x^2}{4}} dx \right\} \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$I_2 = -\frac{2\pi\tau_0 b^2}{\alpha} \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z')} \left[A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} \right] \times \right.$$

$$\begin{aligned}
& \times \int_0^{\infty} J_0(xr) \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z')\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}}}{\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} e^{-\frac{b^2x^2}{4}} x dx \left. \right\} \\
I_3 = & \frac{2\pi\tau_0 b^2}{\alpha} \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z')} \left[A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z-z_n)^2}{a^2}} \right] \times \right. \\
& \left. \times \int_0^{\infty} J_0(xr) \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z')\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}}}{\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} e^{-\frac{b^2x^2}{4}} x dx \right\}
\end{aligned}$$

Рассмотрим интеграл, содержащий функцию Бесселя:

$$\tilde{I} = \int_0^{\infty} J_0(xr) \frac{e^{-k\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}}}{\sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}} e^{-\frac{b^2x^2}{4}} x dx \quad (2.47)$$

Произведем в нем замену переменной: $u = \sqrt{1+\frac{4x^2}{\alpha^2}}$. В результате этой замены интеграл (2.47) преобразуется к виду:

$$\tilde{I} = \frac{\alpha^2}{2} e^{\frac{\alpha^2 b^2}{16}} \int_1^{\infty} J_0 \left[\frac{\alpha r}{2} (u^2 - 1)^{1/2} \right] e^{-ku - \frac{\alpha^2 b^2}{16} u^2} du \quad (2.48)$$

В работе (Tzur, Roble, 1985) для проведения численных расчетов выбирались следующие значения параметров a и b : $a = 1$ км, $b = 1,5$ км. При $\alpha = 0,2$ км⁻¹ $\alpha^2 b^2 / 16 = 5,625 \cdot 10^{-3}$, поэтому

$$\tilde{I} \cong \frac{\alpha^2}{4} \int_1^{\infty} J_0 \left[\frac{\alpha r}{2} (u^2 - 1)^{1/2} \right] e^{-ku} du = \frac{\alpha^2}{4} \frac{e^{-\sqrt{k^2 + \frac{\alpha^2 r^2}{4}}}}{\sqrt{k^2 + \frac{\alpha^2 r^2}{4}}} \quad (2.49)$$

Используя (2.49), получим для $\varphi(r, z)$ выражение:

$$\begin{aligned}
\varphi(r, z) = 2\pi\tau_0 b^2 \left\{ \int_0^\infty e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z')} \left[A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} \right. \right. \\
+ A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} \left. \left. \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z-z')+r^2}}}{\sqrt{(z-z')+r^2}} dz' - \right. \right. \\
- \int_0^\infty e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z')} \left[A_+ e^{-\frac{(z-z_p)^2}{a^2}} \right. \\
+ A_- e^{-\frac{(z-z_n)^2}{a^2}} \left. \left. \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z+z')+r^2}}}{\sqrt{(z+z')+r^2}} dz' \right\} \right.
\end{aligned} \tag{2.50}$$

Выражение (2.50) можно упростить при $z_p \gg \alpha a^2/4$, $z_n \gg \alpha a^2/4$. При этих условиях оно принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
\varphi(r, z) = \\
= 2\pi\tau_0 b^2 \left\{ A_+ e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_p)} \int_0^\infty e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z-z')^2+r^2}}}{\sqrt{(z-z')^2+r^2}} dz' + \right. \\
+ A_- e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_n)} \int_0^\infty e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z-z')^2+r^2}}}{\sqrt{(z-z')^2+r^2}} dz' - \\
- A_+ e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_p)} \int_0^\infty e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z+z')^2+r^2}}}{\sqrt{(z+z')^2+r^2}} dz' - \\
\left. - A_- e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_n)} \int_0^\infty e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z+z')^2+r^2}}}{\sqrt{(z+z')^2+r^2}} dz' \right\}
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Дальнейшее упрощение (2.51) возникает при выполнении условий $z_p \gg a$, $z_n \gg a$. В работе (Tzur, Roble, 1985) принимается: $z_p = 10$ км, $z_n = 5$ км. В этих условиях выражение для $\varphi(r, z)$ преобразуется к следующему:

$$\begin{aligned}
\varphi(r, z) = \pi \tau_0 b^2 a \left\{ A_+ e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_p)} \times \right. \\
\times \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z-z_p)^2+r^2}}}{\sqrt{(z-z_p)^2+r^2}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z+z_p)^2+r^2}}}{\sqrt{(z+z_p)^2+r^2}} \right] \times \\
\times \left(\int_0^{\infty} e^{-u^2} du + \int_0^{z_p/a} e^{-u^2} du \right) + \\
+ A_- e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_n)} \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z-z_n)^2+r^2}}}{\sqrt{(z-z_n)^2+r^2}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\sqrt{(z+z_n)^2+r^2}}}{\sqrt{(z+z_n)^2+r^2}} \right] \times \\
\times \left. \left(\int_0^{\infty} e^{-u^2} du + \int_0^{z_n/a} e^{-u^2} du \right) \right\} \quad (2.52)
\end{aligned}$$

Полученное выражение (2.52) подобно по своей структуре выражению для потенциала электрического поля, создаваемого точечными электрическими зарядами в проводящей атмосфере с экспоненциальной электрической проводимостью (Holser, Saxon, 1952).

При достаточно больших b $a^2 b^2 \gg 1$, интеграл (2.47) равен $2/b^2$ и задача сводится к одномерной.

2.4 Распределение электрического поля, создаваемого токовым источником, с учетом скачков электрической проводимости на границах плоскопараллельного облака

Рассмотренную выше задачу можно обобщить, учитывая скачки электрической проводимости на границе «облако — свободная атмосфера», т. е. будем предполагать, что токовый источник (2.42)

помещен в плоскопараллельную облачную среду с электрической проводимостью, задаваемой следующим образом:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{\alpha z}, & 0 \leq z < h, \quad H < z < \infty \\ \bar{\lambda}_1, & h \leq z \leq H \end{cases} \quad (2.53)$$

В случае такого задания электрической проводимости в облаках $H < z < \infty$, $0 \leq z < h$ имеем уравнение (2.31), а в области $H < z < h$:

$$\Delta\varphi = -4\pi\tau_1 \left(A_+ e^{-\frac{(z+z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z-z_p)^2}{a^2}} \right) e^{-\frac{r^2}{b^2}} = S^{(0)} \quad (2.54)$$

где $\tau_1 = (4\pi\bar{\lambda}_1)^{-1}$.

Для решения этой задачи будем использовать граничные условия (2.4).

Применяя преобразование Фурье—Бесселя к уравнениям (2.31), (2.54) с источником (2.42) в (2.31), получим после их решения:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1 = & C_1^{(1)} e^{\lambda_1 z} + e^{\lambda_1 z} \int_0^z \frac{\bar{S} e^{-\lambda_1 z'}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} dz' + C_2^{(1)} e^{\lambda_2 z} - \\ & - e^{\lambda_2 z} \int_0^z \frac{\bar{S} e^{-\lambda_2 z'}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} dz', \quad 0 \leq z < h \\ \bar{\varphi}_2 = & C_1^{(2)} e^{xz} + e^{xz} \int_h^z \frac{\bar{S}^{(0)} e^{-xz'}}{2x} dz' + C_2^{(2)} e^{-xz} - \\ & - e^{-xz} \int_h^z \frac{\bar{S}^{(0)} e^{xz'}}{2x} dz', \quad h \leq z \leq H \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$\bar{\varphi}_3 = C_1^{(3)} e^{\lambda_1 z} + e^{\lambda_1 z} \int_H^z \frac{\bar{S} e^{-\lambda_1 z'}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} dz' + C_2^{(3)} e^{\lambda_2 z} - e^{\lambda_2 z} \int_H^z \frac{\bar{S} e^{-\lambda_2 z'}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} dz', \quad z > H$$

где $C_1^{(i)}, C_2^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$) – постоянные, подлежащие определению.

Используя граничные условия (2.4), получим систему алгебраических уравнений для определения этих постоянных:

$$C_1^{(2)} e^{xH} + C_2^{(2)} e^{-xH} - C_2^{(3)} e^{\lambda_2 H} = -a_1 e^{xH} + a_2 e^{-xH} + C_1^{(3)} e^{\lambda_1 H}$$

$$C_1^{(2)} e^{xh} + C_2^{(2)} e^{-xh} - C_1^{(1)} (e^{\lambda_1 h} - e^{\lambda_2 h}) = b_1 e^{\lambda_1 h} - b_2 e^{\lambda_2 h}$$

$$C_1^{(2)} e^{xh} - C_2^{(2)} e^{-xh} = \frac{1}{\eta(h)x} \times \\ \times \left[C_1^{(1)} (\lambda_1 e^{\lambda_1 h} - \lambda_2 e^{\lambda_2 h}) + b_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 h} - b_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 h} \right]$$

$$C_1^{(2)} e^{xH} - C_2^{(2)} e^{-xH} = -a_1 e^{xH} - a_2 e^{-xH} + \\ + \frac{1}{\eta(H)x} \left(\lambda_1 C_1^{(3)} e^{\lambda_1 H} + \lambda_2 C_2^{(3)} e^{\lambda_2 H} \right) \quad (2.56)$$

$$C_1^{(1)} + C_2^{(1)} = 0 \quad C_1^{(3)} = - \int_H^\infty \frac{\bar{S} e^{-\lambda_1 z'}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} dz'$$

$$(h) = \frac{\bar{\lambda}_1}{\lambda(h)} \quad \eta(H) = \frac{\bar{\lambda}_1}{\lambda(H)}$$

$$a_1 = \int_h^H \frac{\bar{S}^{(0)}}{2x} e^{-xz} dz \quad a_2 = \int_h^H \frac{\bar{S}^{(0)}}{2x} e^{xz} dz$$

$$b_1 = \int_0^h \frac{\bar{S} e^{-\lambda_1 z}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} dz \quad b_2 = \int_0^h \frac{\bar{S} e^{-\lambda_2 z}}{\sqrt{\alpha^2 + 4x^2}} dz$$

Приведем решение (2.56) в предельном случае $\eta(h) \ll 1$, $\eta(H) \ll 1$.

Поскольку представляет особый интерес решения при $0 \leq z < h$, $z > H$, выпишем выражения для постоянных $C_1^{(1)}$, $C_2^{(3)}$:

$$C_1^{(1)} = \frac{1}{\lambda_1 e^{\lambda_1 h} - \lambda_2 e^{\lambda_2 h}} \times$$

$$\times \left\{ e^{-x(H-h)} \left[-2a_1 \eta(h) x e^{xH} + \lambda_2 \frac{\eta(h)}{\eta(H)} C_2^{(3)} e^{\lambda_2 H} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \lambda_1 \frac{\eta(h)}{\eta(H)} C_1^{(3)} e^{\lambda_1 H} \right] - \right.$$

$$\left. - \lambda_1 b_1 e^{\lambda_1 h} + \lambda_2 b_2 e^{\lambda_2 h} \right\} \quad (2.57)$$

$$C_2^{(3)} = \frac{\eta(H)}{\lambda_2} \frac{e^{-\lambda_2 H}}{\operatorname{sh} x(H-h)} \int_h^H \bar{S}^{(0)} \operatorname{sh} x(z-h) dz -$$

$$- C_1^{(3)} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{(\lambda_1 - \lambda_2)H}$$

При $H - z \gg a$ можно положить $C_1^{(3)} \approx 0$ и для φ_3 получим:

$$\varphi_3 = -4\pi\tau_1 \eta(H) \int_0^\infty J_0(xr) x \frac{e^{\lambda_2(z-H)}}{\lambda_2 \operatorname{sh} x(H-h)} \times$$

$$\times \left(\int_h^H \left(A_+ e^{-\frac{(z'+z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z'+z_n)^2}{a^2}} \right) \times \right.$$

$$\left. \times \frac{b^2}{2} e^{-\frac{b^2 x^2}{4}} \operatorname{sh} x(z'-h) dz' \right) dx \quad (2.58)$$

Предполагая $z_p \gg a$, $z_n \gg a$, преобразуем (2.58) к виду:

$$\begin{aligned} \varphi_3 = & -2\pi\tau_1\eta(H)b^2 \int_0^\infty J_0(xr)x \frac{e^{\lambda_2(z-H)}}{\lambda_2 \operatorname{sh} x(H-h)} \times \\ & \times \left[\operatorname{sh}x(z_p-h) \int_h^H A_+ e^{-\frac{(z'+z_p)^2}{a^2}} dz' + \right. \\ & \left. + \operatorname{sh}x(z_n-h) \int_n^H A_- e^{-\frac{(z'+z_n)^2}{a^2}} dz' \right] e^{-\frac{b^2x^2}{4}} dx \end{aligned} \quad (2.59)$$

Для достаточно больших расстояний $r \gg \alpha^{-1}$ ($x/\alpha \ll 1$) имеем вместо (2.59):

$$\begin{aligned} \varphi_3 = & \frac{2\pi\tau_1\eta(H)}{\alpha} b^2 e^{-\alpha(z-H)} \times \\ & \times \int_0^\infty J_0(xr)x \left[\frac{\operatorname{sh}x(z_p-h)}{\operatorname{sh}x(H-h)} \int_h^H A_+ e^{-\frac{(z'+z_p)^2}{a^2}} dz' + \right. \\ & \left. + \frac{\operatorname{sh}x(z_n-h)}{\operatorname{sh}x(H-h)} \int_n^H A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} dz' \right] dx \end{aligned} \quad (2.60)$$

Для вычисления интегралов в (2.60), содержащих функцию Бесселя $J_0(xr)$ можно использовать прием, примененный в п. 2.1.

В общем случае выражение (2.58) можно привести при $r \gg \alpha^{-1}$ к виду:

$$\varphi_3 = \frac{2\pi\tau_1\eta(H)}{\alpha} e^{-\alpha(z-H)} \times \quad (2.61)$$

$$\times \int_h^H \left[A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} \right] dz' \times \\ \times \int_0^\infty J_0(xr) x \frac{\text{sh}x(z'-h)}{\text{sh}x(H-h)} dx$$

Для близких расстояний $r \ll a^{-1}$ ($x/a \gg 1$) из выражения (2.58) получим:

$$\varphi_3 = 2\pi\tau_1\eta(H)b^2 \int_h^H \left[A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} \right] dz' \times \\ \times \int_0^\infty J_0(xr) \frac{\text{sh}x(z'-h)}{\text{sh}x(H-h)} e^{-x(H-h)} e^{-\frac{b^2x^2}{4}} dx \quad (2.62)$$

При $z_p \gg a$, $z_n \gg a$ из выражения (2.62) имеем:

$$\varphi_3 = 2\pi\tau_1\eta(H)b^2 \times \left\{ \int_h^H A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} dz' \times \right. \\ \times \int_0^\infty J_0(xr) \frac{\text{sh}x(z_p-h)}{\text{sh}x(H-h)} e^{-x(H-h)} e^{-\frac{b^2x^2}{4}} dx + \\ \left. + \int_h^H A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} dz' \int_0^\infty J_0(xr) \frac{\text{sh}x(z_n-h)}{\text{sh}x(H-h)} e^{-x(H-h)} e^{-\frac{b^2x^2}{4}} dx \right\} \quad (2.63)$$

Для вычисления внутренних интегралов в выражении (2.63), содержащих функцию Бесселя $J_0(xr)$, сделаем замену переменной

$y = bx$ и представим выражение $e^{-y/b(z-H)} \frac{\text{sh} \frac{y}{b}(z_p-h)}{\text{sh} \frac{y}{b}(H-h)}$ в виде разложения:

$$e^{-y/b(z-H)} \frac{\text{sh} \frac{y}{b}(z_p-h)}{\text{sh} \frac{y}{b}(H-h)} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ e^{-\frac{y}{b}[z-z_p+2n(H-h)]} e^{-\frac{y}{b}[z+z_p-2h+2n(H-h)]} \right\} \quad (2.64)$$

Тогда вычисление первого внутреннего интеграла в (2.63) сведется к вычислению выражения:

$$\int_0^{\infty} J_0\left(y \frac{r}{b}\right) \frac{\text{sh} \frac{y}{b}(z_p-h)}{\text{sh} \frac{y}{b}(H-h)} e^{-x(z-H)} e^{-\frac{y^2}{4}} dy = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ e^{-\frac{[z-z_p+2n(H-h)]^2}{b^2}} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{2} \int_{\frac{1}{2}\beta_{1n}}^{\infty} e^{-z^2} dz - e^{-\frac{[z+z_p-2h+2n(H-h)]^2}{b^2}} \frac{1}{2} \int_{\frac{1}{2}\beta_{2n}}^{\infty} e^{-z^2} dz \right\} \quad (2.65)$$

$$\beta_{1n} = \frac{z - z_p + 2n(H-h)}{b},$$

$$\beta_{2n} = \frac{z + z_p - 2h + 2n(H-h)}{b}$$

При выводе (2.65) использовалось предположение $r \ll b$. Аналогичные вычисления проводятся и для второго внутреннего интеграла в (2.63).

Используя выражение (2.60) для потенциала $r \gg \alpha^{-1}$, найдем вертикальную и горизонтальную составляющие напряженности электрического поля при $z > H$:

$$\begin{aligned}
 E_{3z} &= 2\pi\tau_1\eta(H) b^2 e^{-\alpha(z-H)} \times \\
 &\times \int_0^\infty J_0(xr)x \left[\frac{\operatorname{sh}x(z_p - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} \int_h^H A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} dz' + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\operatorname{sh}x(z_n - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} \int_n^H A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} dz' \right] dx \\
 E_{3r} &= \frac{2\pi\tau_1\eta(H) b^2 e^{-\alpha(z-H)}}{\alpha} \times \\
 &\times \int_0^\infty J_1(xr)x^2 \left[\frac{\operatorname{sh}x(z_p - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} \int_h^H A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} dz' + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\operatorname{sh}x(z_n - h)}{\operatorname{sh}x(H - h)} \int_n^H A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} dz' \right] dx
 \end{aligned} \tag{2.66}$$

При $z < h$, пренебрегая в выражении для $C_1^{(1)}$ в (2.57) членами, содержащими $b_1, b_2, C_1^{(3)}$, получим для $C_1^{(1)}$ и $\bar{\varphi}_1$ представления:

$$\begin{aligned}
 C_1^{(1)} &\approx -\frac{\eta(h)}{\operatorname{sh}x(H - h)(\lambda_1 e^{\lambda_1 h} - \lambda_2 e^{\lambda_2 h})} \int_h^H \bar{S}^{(0)} \operatorname{sh}x(H - z) dz \\
 \bar{\varphi}_1 &\approx -\frac{\eta(h)(e^{\lambda_1 z} - e^{\lambda_2 z})}{\operatorname{sh}x(H - h)(\lambda_1 e^{\lambda_1 h} - \lambda_2 e^{\lambda_2 h})} \int_h^H \bar{S}^{(0)} \operatorname{sh}x(H - z) dz
 \end{aligned} \tag{2.67}$$

Отсюда имеем следующее выражение для φ_1 :

$$\varphi_1 = -\eta(h) \int_0^\infty \frac{(e^{\lambda_1 z} - e^{\lambda_2 z}) J_0(xr) x}{\operatorname{sh}x(H-h)(\lambda_1 e^{\lambda_1 h} - \lambda_2 e^{\lambda_2 h})} \times \left[\int_h^H \bar{S}^{(0)} \operatorname{sh}x(H-z) dz \right] dx \quad (2.68)$$

Используя представление для токового источника (2.54), предполагая выполненными условия $z_p \gg a$, $z_n \gg a$, получим для $r \gg \alpha^{-1}$:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi\tau_1\eta(h) b^2}{\alpha} \times (1 - e^{-\alpha z}) \int_0^\infty J_1(xr) x \left[\frac{\operatorname{sh}x(H-z_p)}{\operatorname{sh}x(H-h)} \int_h^H A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} dz' + \frac{\operatorname{sh}x(H-z_n)}{\operatorname{sh}x(H-h)} \int_h^H A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} dz' \right] dx \quad (2.69)$$

Из (2.69) следуют выражения для E_{1z} и E_{1r} при $z < h$:

$$E_{1z} = -2\pi\tau_1\eta(h) b^2 e^{-\alpha z} \times \int_0^\infty J_0(xr) x \left[\frac{\operatorname{sh}x(H-z_p)}{\operatorname{sh}x(H-h)} \int_h^H A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} dz' + \frac{\operatorname{sh}x(H-z_n)}{\operatorname{sh}x(H-h)} \int_h^H A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} dz' \right] dx \quad (2.70)$$

$$E_{1r} = 2\pi\tau_1\eta(h) b^2\alpha^{-1} \times \\ \times (1 - e^{-\alpha z}) \int_1^\infty J_0(xr)x^2 \left[\frac{\operatorname{sh}x(H - z_p)}{\operatorname{sh}x(H - h)} \int_h^H A_+ e^{-\frac{(z'-z_p)^2}{a^2}} dz' + \right. \\ \left. + \frac{\operatorname{sh}x(H - z_n)}{\operatorname{sh}x(H - h)} \int_n^H A_- e^{-\frac{(z'-z_n)^2}{a^2}} dz' \right] dx$$

Выражения (2.70) по своей структуре подобны выражению (2.20) для точечного зарядового источника. В полученных выражениях также предполагается выполненным условие $r \gg b$.

Если по радиусу токовый источник ограничен цилиндрической областью $0 < r < b$, внутри которой он не зависит от r , а вне ее равен нулю, то образ преобразования Фурье—Бесселя для функции $S^{(0)}$ имеет вид (2.71) и все приведенные выше расчеты потенциала и напряженности электрического поля можно повторить для этого случая (2.71):

$$\bar{S}^{(0)} = \left(A_+ e^{-\frac{(z-z_p)^2}{a^2}} + A_- e^{-\frac{(z-z_n)^2}{a^2}} \right) \frac{b}{x} J_1(bx) \quad (2.71)$$

3 Распределение электрического поля, создаваемого нестационарным токовым источником в атмосфере с неоднородной электрической проводимостью

3.1 Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим задачу об электромагнитном поле, создаваемом нестационарным токовым источником, находящимся в проводящей атмосфере с экспоненциальной проводимостью $\lambda = \lambda_0 e^{\alpha z}$ над горизонтальной идеально проводящей земной поверхностью. Предполагая $\varepsilon = 1$, $\mu = 1$ (ε — диэлектрическая проницаемость, μ — магнитная проницаемость), выпишем систему уравнений Максвелла (Джексон, 1965):

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial x}, & \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{4\pi}{c} (\vec{j} + \vec{j}_{\text{ст}}) + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{E} &= 4\pi\rho, & \operatorname{div} \vec{H} &= 0, & \vec{j} &= \lambda \vec{E} \end{aligned} \quad (3.1)$$

где \vec{E}, \vec{H} — напряженности электрического и магнитного полей, $\vec{j}, \vec{j}_{\text{ст}}$ — плотности омического и стороннего электрических токов, ρ — плотность электрического заряда.

Воспользуемся далее представлением векторов E и H через векторный и скалярный потенциалы A и φ (Джексон, 1965):

Рассматривая задачу в цилиндрической системе координат r, ϕ, z , где ось z проходит перпендикулярно земной поверхности через источник, предполагая задачу осесимметричной ($\partial/\partial\phi = 0$), $j_{\text{ст}} = (0, 0, j_{\text{ст}}^z)$ и $A = (0, 0, A_z)$, получим из системы уравнений (3.1), используя (3.2) и уравнение для $\operatorname{rot} H$, следующие его компоненты по координатам z и r :

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) = \\ & = \frac{4\pi}{c} \left[-\lambda \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial A_z}{\partial t} \right) + j_{\text{ст}}^z \right] + \frac{1}{c} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t \partial z} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial r \partial z} = -\frac{4\pi\lambda}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial t} \quad (3.4)$$

Из уравнения (3.4) следует соотношение:

$$\frac{\partial A_z}{\partial z} + \frac{4\pi\lambda}{c} \varphi + \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = c(z, t) \quad (3.5)$$

Постоянная $c(z, t) = 0$, т.к. при $r \rightarrow \infty$, $\varphi \rightarrow 0$, $A_z \rightarrow 0$.

Пусть сторонний ток j_{CT}^z включается в момент времени $t = 0$. Для решения переходной задачи запишем начальные и граничные условия для уравнений (3.3) и (3.5) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi|_{t=0} = \varphi_0(r, z), \quad \varphi|_{z=0} = 0, \quad \varphi|_{R \rightarrow \infty} = 0, \\ R = \sqrt{\bar{x}^2 + y^2 + z^2} \\ \frac{\partial A_z}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad A_z|_{R \rightarrow \infty} = 0, \quad A_z|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial A_z}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Применяя к этим уравнениям последовательно преобразования Фурье—Бесселя и Лапласа (Диткин, Прудников, 1975):

$$\begin{aligned} \hat{f}(x, z, p) &= \int_0^\infty e^{-pt} dt \int_0^\infty f(r, z, t) J_0(xr) r dr \\ f(r, z, t) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} e^{pt} dp \int_0^\infty \hat{f}(x, z, p) J_0(xr) x dx \end{aligned} \quad (3.7)$$

и производя несложные преобразования, получим следующие уравнения для определения функций $\hat{\varphi}$ и \hat{A}_z :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \hat{\varphi}}{dz^2} + \frac{4\pi \lambda'_z}{(p + 4\pi\lambda) \left(x^2 + \frac{4\pi\lambda p}{c^2} + \frac{p^2}{c^2} \right)} \frac{d\hat{\varphi}}{dz} - \left(x^2 + \frac{4\pi\lambda p}{c^2} + \frac{p^2}{c^2} \right) \hat{\varphi} \\ = \frac{4\pi}{p + 4\pi\lambda} \frac{d\hat{j}_{\text{CT}}^z}{dz} - \frac{16\pi \frac{p^2}{c^2} \lambda'_z \hat{j}_{\text{CT}}^z}{(p + 4\pi\lambda) \left(x^2 + \frac{4\pi\lambda p}{c^2} + \frac{p^2}{c^2} \right)} \\ + \frac{\frac{d^2 \bar{\varphi}}{dz^2} \Big|_{t=0} - \bar{\varphi}|_{t=0} \left(x^2 + \frac{4\pi\lambda p}{c^2} + \frac{p^2}{c^2} \right)}{p + 4\pi\lambda} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \hat{A}_z}{dz^2} - \frac{4\pi\lambda'_z}{p + 4\pi\lambda} \frac{d\hat{A}_z}{dz} - \left(x^2 + \frac{4\pi\lambda p}{c^2} + \frac{p^2}{c^2} \right) \hat{A} = \\ = - \frac{4\pi j_{\text{CT}}^z}{c} - \frac{4\pi\lambda'_z \bar{\varphi}|_{t=0}}{c(p + 4\pi\lambda)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

где $\bar{\varphi}$ — преобразование Фурье—Бесселя от потенциала электрического поля в момент времени $t = 0$, $\lambda'_z = d\lambda/dz$.

Граничные условия для решения уравнений (3.8), (3.9) имеют следующий вид:

$$\left. \frac{d\hat{A}_z}{dz} \right|_{z=0} = 0, \quad \hat{A}_z|_{z \rightarrow \infty} = 0, \quad \hat{\varphi}|_{z=0} = 0, \quad \hat{\varphi}|_{z \rightarrow \infty} = 0 \quad (3.10)$$

Определив A_z и φ , можно найти A_z и φ , используя формулу обращения в (3.7). При $c \rightarrow \infty$, где c — скорость света, уравнения (3.8), (3.9) в пренебрежении членами $\sim 1/c^2$ приобретают вид:

$$\frac{d^2 \hat{A}_z}{dz^2} - \frac{4\pi\lambda'_z}{p + 4\pi\lambda} \frac{d\hat{A}_z}{dz} - x^2 \hat{A} = - \frac{4\pi}{c} j_{\text{CT}}^z - \frac{4\pi\lambda'_z \bar{\varphi}|_{t=0}}{c(p + 4\pi\lambda)} \quad (3.11)$$

$$\frac{d^2 \hat{\varphi}}{\partial z^2} + \frac{4\pi\lambda'_z}{p + 4\pi\lambda} \frac{d\hat{\varphi}}{dz} - x^2 \hat{\varphi} = \frac{4\pi}{p + 4\pi\lambda} \frac{d j_{\text{CT}}^z}{dz} + \left. \left(\frac{d^2 \bar{\varphi}}{\partial z^2} - x^2 \bar{\varphi} \right) \right|_{t=0} \quad (3.12)$$

Последнее уравнение (3.12) следует также из уравнения (1.1), если преобразовать его согласно рассмотренной выше методике.

В случае, если рассматривается установившийся гармонический процесс, т.е. все величины пропорциональны $e^{i\omega t}$, то в приведенных выше уравнениях параметр p заменяется на $i\omega$.

Задача нахождения плотности стороннего электрического тока является задачей моделирования облачных электрических полей. Самое простое представление для стороннего электрического тока имеет вид (Hager et al., 1985; Volland, 1984):

$$I_{\text{ст}}^z = n_1 q_1 v_1 (1 - e^{-t/\tau}) \tilde{S} \quad (3.13)$$

где n_1 и q_1 — концентрация и заряд крупных частиц,
 v_1 — скорость их седиментации,
 τ — время релаксации, обусловленное взаимодействием крупных частиц с мелкими, \tilde{S} — площадь поверхности, через которую этот ток протекает.

Тогда плотность стороннего электрического тока в приближении узкого канала, по которому течет этот ток, можно аппроксимировать следующим выражением:

$$j_{\text{ст}}^z = I_{\text{ст}}^z \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) [\theta(z - z_n) - \theta(z - z_p)] \quad (3.14)$$

где $\delta(u)$ — функция Дирака,
 $\theta(u)$ — функция Хевисайда.

В случае, если этот канал имеет конечный радиус a , то для $j_{\text{ст}}^z$ можно написать выражение:

$$j_{\text{ст}}^z = \frac{I_{\text{ст}}^z}{\pi a^2} [\theta(z - z_n) - \theta(z - z_p)] \quad (3.15)$$

Эти выражения использовались нами при решении стационарной задачи. Переходя к производным по z от этих выражений, получим:

$$\begin{aligned} \frac{dj_{\text{ст}}^z}{dz} &= I_{\text{ст}}^z \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) [\delta(z - z_n) - \delta(z - z_p)] \\ \frac{dj_{\text{ст}}^z}{dz} &= \frac{I_{\text{ст}}^z}{\pi a^2} [\delta(z - z_n) - \delta(z - z_p)] \end{aligned} \quad (3.16)$$

Первое представление в (3.16) использовалось в работах (Holser, Saxon. 1952).

3.2 Решение задачи для точечного зарядового устройства

Общее решение уравнения (3.12) при граничных условиях (3.10) с учетом одного члена в первом выражении (3.16) находится с помощью стандартных методов решения дифференциальных уравнений (Камке, 1971). При $|e^{\alpha z}/p\tau_0| < 1$ оно имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi} &= C_1 y_1 + C_2 y_2 - y_1 \int_0^z \frac{f(z')}{\Delta(z')} y_2 dz' + y_2 \int_0^z \frac{f(z')}{\Delta(z')} y_1 dz' \\ y_1 &= \left(-\frac{1}{p\tau_0} e^{\alpha z} \right)^{\bar{\alpha}} F\left(\bar{\alpha}_2, \bar{\beta}_2, \gamma_1, -\frac{1}{p\tau_0} e^{\alpha z}\right) \\ y_2 &= \left(-\frac{1}{p\tau_0} e^{-\alpha z} \right)^{1-\gamma_1+\bar{\alpha}_1} F\left(\bar{\alpha}_2 - \gamma_1 + 1, \bar{\beta}_2 - \gamma_1 + 1, 2 \right. \\ &\quad \left. - \gamma_1, -\frac{1}{p\tau_0} e^{\alpha z} \right) \\ f(z) &= -\frac{2\hat{I}_1(p)}{p + 4\pi\lambda} \delta(z - z_1) + \frac{1}{p + 4\pi\lambda} \int_0^\infty \Delta\varphi|_{t=0} J_0(xr) r dr \\ \Delta(z) &= y_1 y_2' - y_1' y_2, \quad y_i' = \frac{dy_i}{dz}, \quad i = 1, 2 \end{aligned} \tag{3.17}$$

где $\hat{I}_1(p)$ — образ преобразования Лапласа от тока $I_{CT}^z = I_0(1 - e^{-t/r})$,

$$\tau_0 = (4\pi\lambda_0)^{-1},$$

$$\bar{\alpha}_1 = x/\alpha,$$

$$\bar{\alpha}_2 = x/\alpha + \left(1 + \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}\right)/2,$$

$$\bar{\beta}_2 = -x/\alpha + \left(1 - \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}\right)/2,$$

$$\gamma_1 = 1 + 2x/\alpha,$$

$F(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \gamma, u)$ — гипергеометрическая функция.

При $|p\tau_0 e^{-\alpha z}| < 1$ для общего решения получим выражение:

$$\begin{aligned}
\hat{\varphi} &= \bar{C}_1 \bar{y}_1 + \bar{C}_2 \bar{y}_2 - \bar{y}_1 \int_0^z \frac{f(z')}{\bar{\Delta}(z')} \bar{y}_2 + \bar{y}_2 \int_0^z \frac{f(z')}{\bar{\Delta}(z')} \bar{y}_1 dz' \\
\bar{y}_1 &= (-p\tau_0)^{\alpha_1} (e^{-\alpha z})^{\alpha_1} F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0 e^{-\alpha z}) \\
\bar{y}_2 &= (-p\tau_0 e^{-\alpha z})^{1-\gamma+\alpha_1} F(\bar{\alpha} - \gamma + 1, \bar{\beta} - \gamma + 1, 2 \\
&\quad - \gamma, -p\tau_0 e^{-\alpha z}) \\
\bar{\Delta}(z) &= \bar{y}_1 \bar{y}_2' - \bar{y}_1' \bar{y}_2, \quad \frac{d\bar{y}_i}{dz} = y_i', \quad i = 1, 2
\end{aligned} \tag{3.18}$$

где

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \left(1 + \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}\right)/2, \\
\bar{\alpha} &= x/\alpha + \left(1 + \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}\right)/2, \\
\bar{\beta} &= -x/\alpha + \left(1 + \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}\right)/2, \\
\gamma &= 2\alpha_1, \\
C_1, C_2, C_3, C_4 &\text{ — постоянные.}
\end{aligned}$$

Рассмотрим первое решение (3.17), соответствующее малым значениям переменной $|e^{\alpha z}/p\tau_0| < 1$. Малость значений этого аргумента $|u| = |e^{\alpha z}/p\tau_0| \ll 1$ соответствует большим значениям $|p|$ или малым значениям времени t (Бейтмен, Эрдейн, 1973). Поэтому это решение соответствует малым временам, прошедшим от момента включения токового источника или от момента появления в некоторой области атмосферы электрического заряда Q , обусловленного, например, молниевым разрядом. В общем случае оба эти процесса могут идти одновременно, но в настоящем отчете мы рассмотрим их раздельно, чтобы не загромождать изложение.

При фиксированном значении параметра p в виду экспоненциального роста электрической проводимости λ существует значение координаты $z = z_*$, при которой выполнено условие $|4\pi\lambda_0 e^{\alpha z_*}/p| = 1$ и решение (3.17) должно переходить в область, где $|4\pi\lambda_0 e^{\alpha z}/p| > 1$. Используя формулу, дающую аналитическое продолжение функции $F(a, b, c, u)$ из области $|u| < 1$ в область $|u| > 1$ (Бейтмен, Эрдейн, 1973):

$$\begin{aligned}
F(a, b, c, u) &= \frac{\Gamma(c)\Gamma(b-a)}{\Gamma(b)\Gamma(c-a)} (-u)^{-a} \times \\
&\times F\left(a, 1+a-c, 1+a-b, \frac{1}{u}\right) + \\
&+ \frac{\Gamma(c)\Gamma(a-b)}{\Gamma(a)\Gamma(c-b)} (-u)^{-b} F\left(b, 1+b-c, 1+b-a, \frac{1}{u}\right)
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Найдем аналитическое продолжение решения (3.17) в область $|e^{\alpha z}/p\tau_0| > 1$ и определяя постоянные C_1, C_2 с помощью граничных условий (3.10), получим асимптотическое решение, соответствующее условиям: $|e^{\alpha z}/p\tau_0| \ll 1$, $\tau_0/t \gg 1$, $z < h(p) = \alpha^{-1} \ln p\tau_0$, $r \gg \alpha^{-1}$, $(x/\alpha \ll 1)$:

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= \frac{2}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \hat{I}_1(p) \frac{e^{pt}}{p} dp \int_0^\infty \frac{\text{sh}xz \text{sh}x(h(p)-z_1)}{\text{sh}xh(p)} J_0(xr) dx, \\
&\quad z < z_1 \\
\varphi_2 &= \frac{2}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \hat{I}_1(p) \frac{e^{pt}}{p} dp \int_0^\infty \frac{\text{sh}xz_1 \text{sh}x(h(p)-z)}{\text{sh}xh(p)} J_0(xr) dx, \\
&\quad z > z_1 \\
\varphi_3 &= \frac{2}{2\pi i \alpha} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \hat{I}_1(p) \frac{e^{pt}}{p} dp \int_0^\infty \frac{\text{sh}xz_1}{\text{sh}xh(p)} e^{-\alpha(z-h(p))} J_0(xr) x dx, \\
&\quad z > h(p)
\end{aligned} \tag{3.20}$$

φ_1 Если в момент $t = 0$ в атмосфере возник электрический заряд, то в формулах (3.20) $\hat{I}_1(p)$ заменяется на Q . При $\ln \frac{\tau_0}{t} \gg 1$ и $\hat{I}_1(p) = I_0/p(1+p\tau)$, что соответствует $I_{\text{ст}}^z = I_0(1 - e^{-t/\tau})$, получим асимптотическое решение:

$$\varphi_1 = 2I_0 \int_0^t \left(1 - e^{-\frac{t-\tilde{\tau}}{\tau}}\right) d\tilde{\tau} \int_0^\infty \frac{\text{sh}xz \text{sh}x(h(\tilde{\tau}) - z_1)}{\text{sh}xh(\tilde{\tau})} J_0(xr) dx, \quad z < z_1$$

$$\varphi_2 = 2I_0 \int_0^t \left(1 - e^{-\frac{t-\tilde{\tau}}{\tau}}\right) d\tilde{\tau} \int_0^\infty \frac{\text{sh}xz_1 \text{sh}x(h(\tilde{\tau}) - z)}{\text{sh}xh(\tilde{\tau})} J_0(xr) dx, \quad z > z_1 \quad (3.21)$$

$$\varphi_3 = \frac{2I_0}{\alpha} \int_0^t \left(1 - e^{-\frac{t-\tilde{\tau}}{\tau}}\right) d\tilde{\tau} \int_0^\infty \frac{\text{sh}xz_1}{\text{sh}xh(\tilde{\tau})} e^{-\alpha(z-h(\tilde{\tau}))} J_0(xr) x dx, \quad z > h(t) = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{t_0}{t}$$

При $\Delta\varphi|_{t=0} = -4\pi Q\delta(\vec{r} - \vec{r}_1)$ и $I_0 = 0$ для φ_1 имеем:

$$\varphi_1 = 2Q \int_0^\infty \frac{\text{sh}xz \text{sh}x(h(t) - z_1)}{\text{sh}xh(t)} J_0(xr) dx, \quad z < z_1 \quad (3.22)$$

Используя выражение (3.22), найдем выражение для напряженности электрического поля при $z = 0$. Соответствующие вычисления дают:

$$E_{1z}|_{z=0} = -2Q \int_0^\infty \frac{\text{sh}x[h(t) - z_1]}{\text{sh}xh(t)} J_0(xr) dx, \quad (3.23)$$

При $r > h(t)$, используя формулу (3.16), получим следующее асимптотическое выражение для $E_{1z}|_{z=0}$:

$$\begin{aligned}
 E_{1z}|_{z=0} &\approx -\frac{4\pi Q}{h^2(t)} \sin \frac{\pi z_1}{h(t)} K_0 \left(\frac{\pi r}{h(t)} \right) \approx \\
 &\approx -\frac{4\pi Q}{h^2(t)} \sin \frac{\pi z}{h(t)} \left(\frac{h(t)}{2r} \right)^{1/2} e^{-\frac{\pi r}{h(t)}}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

При $r < h(t)$ имеем:

$$E_{1z}|_{z=0} \approx -\frac{2Qz_1}{(r^2 + z_1^2)^{3/2}} \left\{ 1 - \frac{(2h(t) - z_1)(r^2 + z_1^2)^{3/2}}{\{r^2[2h(t) - z_1]^2\}^{3/2} z_1} \right\} \tag{3.25}$$

Физический смысл масштаба высот $h(t)$ состоит в следующем: $h(t)$ отделяет область с малыми значениями времен электрической релаксации, где стационарное электрическое состояние атмосферы устанавливается быстро от области, где влияние электрической проводимости мало. Высота $h(t)$ определяется из условия:

$$4\pi\lambda_0 e^{\alpha h(t)} t = 1. \tag{3.26}$$

Из (3.26) получим выражение для $h(t)$, которое нами было получено из общего решения задачи:

$$h(t) = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\tau_0}{t}. \tag{3.27}$$

Приведем некоторые численные оценки величины $h(t)$. При $\alpha = 0,2 \text{ км}^{-1}$, $\tau_0 = 20$ мин и $t = 10$ с $h(t) = 24$ км, при $t = 2$ с $h(t) = 31$ км, при $\tau_0 = 4$ мин и $t = 2$ с $h(t) = 21$ км, т. е. значение величины $h(t)$ существенным образом зависит от электрической проводимости вблизи земной поверхности.

При $|p\tau_0 e^{-\alpha z}| < 1$ решение (3.18) записывается в следующем виде при $\Delta\varphi|_{t=0} = 0$ и $z < z_1$, $z > z_1$:

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{2\hat{I}_1(p)\tau_1}{\alpha} e^{pt} dp \int_0^\infty \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0 e^{-\alpha z_1})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0)} e^{-\frac{\alpha z_1}{2}} \times \\
&\quad \times \left(\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} - 1 \right) \times \\
&\quad \times [e^{-\alpha \bar{\alpha}_1 z} F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0) F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, -p\tau_0 e^{\alpha z}) - \\
&\quad - e^{-\alpha \alpha_1 z} F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0 e^{-\alpha z}) \times \\
&\quad \times F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, -p\tau_0)] \frac{J_0(xr)xdx}{\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}}}, \quad z < z_1 \\
\varphi_2 &= \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{2\hat{I}_1(p)\tau_0}{\alpha} e^{pt} dp \int_0^\infty \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0 e^{-\alpha z_1})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0)} e^{-\frac{\alpha z}{2}} \times \\
&\quad \times \left(\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} - 1 \right) \times \\
&\quad \times [e^{-\alpha \bar{\alpha}_1 z_1} F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0) F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, -p\tau_0 e^{\alpha z_1}) - \\
&\quad - e^{-\alpha \alpha_1 z} F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0 e^{-\alpha z_1}) \times \\
&\quad \times F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, -p\tau_0)] \frac{J_0(xr)xdx}{\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}}}, \quad z > z_1
\end{aligned} \tag{3.28}$$

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

$$\begin{aligned}
\bar{\alpha}_1 &= \left(1 - \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}\right)/2, & \bar{\alpha}_1 &= \bar{\alpha}_1 + x/\alpha, \\
\bar{\beta}_1 &= \bar{\alpha}_1 - x/\alpha, & \gamma_1 &= 1 - \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}
\end{aligned}$$

При $p \rightarrow 0$ решение (3.28) стремится к стационарному решению, даваемому теорией Хольцера—Саксона (Holser, Saxon, 1952).

С помощью первого решения в (3.28) можно найти напряженность электрического поля вблизи земной поверхности при $z = 0$.

Полагая $\hat{I}_1(p) = \frac{I_0}{p(1+p\tau)}$, получим:

$$\begin{aligned}
 E_z(0, t) = & -2I\tau_1 \int_0^{\infty} J_0(xr) e^{-\frac{\alpha z_1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} - 1 \right)} x dx \times \\
 & \times \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \left[\frac{1}{p} - \frac{1}{p + \frac{1}{\tau}} - \frac{\tau_0}{\tau_0 - \tau_1} \left(\frac{1}{p + \frac{1}{\tau_0}} - \frac{1}{p + \frac{1}{\tau}} \right) \right] \times \\
 & \times \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0 e^{-\alpha z_1})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0)} \Big] e^{pt} dp
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

При $\alpha z_1 \ll 1$ из (3.29) следует:

$$\begin{aligned}
 E_z(0, t) = & -2I_0\tau_1 e^{-\frac{\alpha}{2}(\sqrt{z_1^2+r^2}-z_1)} \times \\
 & \times \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{\tau_0}{\tau_0 - \tau} \left(e^{-\frac{t}{\tau_0}} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] \frac{\alpha z_1 \left[1 + \frac{2}{\alpha(r^2 + z_1^2)^{1/2}} \right]}{2(r^2 + z_1^2)}
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

При $\alpha z_1 \gg 1$ для $E_z(0, t)$ имеем:

$$\begin{aligned}
 E_z(0, t) = & -\frac{2I_0\tau_1}{2\pi i} \int_0^{\infty} J_0(xr) e^{-\frac{\alpha z_1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4x^2}{\alpha^2}} - 1 \right)} x dx \times \\
 & \times \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{F^{-1}(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -p\tau_0)}{p(1+p\tau_0)(1+p\tau)} e^{pt} dp
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Для вычисления интегралов (3.31) воспользуемся условием, что при $\alpha z_1 \gg 1$ экспонента в (3.31) играет существенную роль при $x^2/\alpha^2 \ll 1$. В этом случае для гипергеометрической функции $F(\alpha, \beta, \gamma, -p\tau_0)$ можно использовать представление (Градштейн, Рыжик, 1971):

$$F(1, 1, 2, -p\tau_0) = \frac{\ln(1 + p\tau_0)}{p\tau_0} \quad (3.32)$$

При $\tau_0 \gg \tau$ вычисления в интегралах (3.31) с использованием (3.32) приводят к следующему представлению для $E_z(0, t)$:

$$E_z(0, t) = -\frac{2I_0\tau_1\alpha z_1}{(r^2 + z_1^2)} e^{-\frac{\alpha}{2}(\sqrt{z_1^2 + r^2} - z_1)} \times \\ \times \left[1 + \frac{2}{\alpha(r^2 + z_1^2)^{1/2}} \right] \tilde{v}_1\left(\frac{t}{\tau_0}\right) \quad (3.33)$$

$$\tilde{v}_1\left(\frac{t}{\tau_0}\right) = 1 - \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{t}{\tau_0}(1+z)}}{z(\pi^2 + \ln^2 z)} dz, \quad \tau_1 = (4\pi\lambda(z_1))^{-1}$$

Из выражения (3.30) и (3.33) следует, что $\tau_0 \gg \tau_1 > \tau$ время установления стационарного электрического тока определяется наибольшим из времен τ_0 .

Для небольших расстояний $r \ll \alpha^{-1}$ ($x/\alpha \gg 1$), используя для $F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, x)$ асимптотическое выражение при $x/\alpha \gg 1$ (Градштейн, Рыжик, 1971):

$$F\left(\frac{2x}{\alpha}, \frac{1}{2}, \frac{2x}{\alpha}, u\right) = \frac{1}{(1-u)^{1/2}} \quad (3.34)$$

получим:

$$\begin{aligned}
E_z(0, t) &= -\frac{2I_0\tau_1z_1}{(r^2 + z_1^2)^{3/2}} \frac{1}{\sqrt{\tau_0\tau_1}} \int_0^t e^{-\frac{(\tau_1+\tau_0)}{2\tau_0\tau_1}t'} I_0 \left[\frac{\tau_0 - \tau_1}{2\tau_0\tau_1} t' \right] dt' = \\
&= -\frac{2I_0\tau_1z_1}{(r^2 + z_1^2)^{3/2}} \left(1 - \frac{2\tau_0\tau_1}{\tau_0 + \tau_1} e^{-t/\tau_0} \times \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau_0 + \tau_1)t}} + \dots \right)
\end{aligned} \tag{3.35}$$

При $z > z_1$ и $\alpha z/2 \gg 1$ вычисления вертикальной составляющей напряженности электрического поля приводят к следующему результату:

$$\begin{aligned}
E_z(z, t) &= -\frac{2I_0\tau_1\alpha z}{r^2 + z^2} \left[1 + \frac{2}{\alpha(r^2 + z^2)^{1/2}} \right] e^{-\frac{\alpha}{2}[(z-z_1)+\sqrt{r^2+z^2}]} \times \\
&\times \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{\tau(z)}} - \frac{1}{\tau_0\tau(z)} \int_0^t E_1 \left(\frac{t-\tau}{\tau(z_1)} \right) \right. \\
&\times \left. \left(\int_0^\tau e^{-\frac{\tau-\tau'}{\tau(z)}} e^{-\frac{\tau'}{\tau_0}} v \left(\frac{\tau'}{\tau_0} \right) d\tau' \right) \right\} d\tau \\
E_1 \left[\frac{t}{\tau(z_1)} \right] &= \int_0^\infty e^{-\frac{t}{\tau(z_1)} \frac{du}{u}}
\end{aligned} \tag{3.36}$$

и

$$v \left(\frac{\tau'}{\tau_0} \right) = e^{\frac{\tau'}{\tau_0}} - \int_0^\infty \frac{e^{-z\frac{\tau'}{\tau_0}}}{z(\ln^2 z + \pi^2)} dz$$

При $t \rightarrow \infty$ $E_z(z, t)$ стремится к стационарному решению с характерными временами $\tau(z_1)$, $\tau(z)$, τ_0 .

Обратимся к решению задачи о точечном зарядовом источнике для случая, когда электрическая проводимость задана в виде (2.2). Тогда основные уравнения, описывающие электрическое поле, будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \varphi_0 + 4\pi \lambda_1 \Delta \varphi_0 &= -4\pi I_1(t) \delta(\bar{x}) \delta(y) \delta(z - z_1), \quad h \leq z \leq H \\ \frac{\partial}{\partial t} \Delta \varphi_{1,2} + 4\pi \nabla(\lambda \nabla \varphi_{1,2}) &= 0, \quad 0 \leq z < h, \quad z > H \end{aligned} \quad (3.37)$$

Наряду с начальными и граничными условиями (3.6) в этой задаче используются условия непрерывности φ_1 их производных при $z = h, H$:

$$\begin{aligned} \varphi_0(h) &= \varphi_1(h), \quad \left(\lambda_1 + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \varphi_0}{\partial z} \Big|_{z=h} = \\ &= \left(\lambda(h) + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=h} \\ \varphi_0(H) &= \varphi_2(H), \quad \left(\lambda_1 + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \varphi_0}{\partial z} \Big|_{z=H} = \\ &= \left(\lambda(H) + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=H} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Рассматривая данную задачу в цилиндрической системе координат и используя преобразования Фурье—Бесселя и Лапласа, получим следующую систему уравнений для образов этих преобразований:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \hat{\varphi}_0}{dz^2} - x^2 \hat{\varphi}_0 &= -\frac{2I_1(p)}{p + 4\pi \lambda_1} \delta(z - z_1) + \int_0^\infty \frac{\Delta \varphi|_{t=0}}{p + 4\pi \lambda_1} J_0(xr) r dr \\ \frac{d^2 \hat{\varphi}_{1,2}}{dz^2} + \frac{4\pi \alpha \lambda}{p + 4\pi \lambda} \frac{d\hat{\varphi}_{1,2}}{dz} - x^2 \hat{\varphi}_{1,2} &= 0, \quad 0 \ll z < h, \quad z > H \end{aligned} \quad (3.39)$$

Условия (3.38) при этом записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\hat{\varphi}_0(h) &= \hat{\varphi}_1(h), \quad \left(\lambda_1 + \frac{p}{4\pi}\right) \frac{d\hat{\varphi}_0}{dz} \Big|_{z=h} - \frac{d\tilde{\varphi}_0}{dz} \Big|_{t=0, z=h} = \\
&= \left(\lambda(h) + \frac{p}{4\pi}\right) \frac{d\tilde{\varphi}_1}{dz} \Big|_{z=h} - \frac{\partial \tilde{\varphi}_1}{\partial z} \Big|_{t=0, z=h} \\
\hat{\varphi}_0(H) &= \hat{\varphi}_2(H), \quad \left(\lambda_1 + \frac{p}{4\pi}\right) \frac{d\varphi_0}{dz} \Big|_{z=H} - \frac{\partial \tilde{\varphi}_0}{\partial z} \Big|_{t=0, z=H} = \\
&= \left(\lambda(H) + \frac{p}{4\pi}\right) \frac{d\hat{\varphi}_2}{dz} \Big|_{z=H} - \frac{\partial \tilde{\varphi}_2}{\partial z} \Big|_{t=0, z=H}
\end{aligned} \tag{3.40}$$

где $\tilde{\varphi}_i$ — образы преобразования Фурье—Бесселя.

Рассмотрим решение первого уравнения в системе (3.39), предполагая $\Delta\varphi|_{t=0} = 0$. При $z > z_1$ запишем решение в следующем виде:

$$\hat{\varphi}_0 = C_3 e^{-xz} + C_4 e^{xz} \tag{3.41}$$

а при $z < z_1$:

$$\hat{\varphi}_0 = \bar{C}_3 e^{-xz} + \bar{C}_4 e^{xz} \tag{3.42}$$

Постоянные, входящие в (3.41) и (3.42), связаны друг с другом соотношением:

$$C_4 - \bar{C}_4 = -\frac{\hat{I}_1(p)e^{-xz_1}}{x(p + 4\pi\lambda_1)}, \quad C_3 - \bar{C}_3 = \frac{\hat{I}_1(p)e^{xz_1}}{x(p + 4\pi\lambda_1)} \tag{3.43}$$

Решение второго уравнения в (3.39) запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned}\hat{\varphi}_1 &= C_1 y_1 + C_2 y_2 & z > H \\ \hat{\varphi}_2 &= \bar{C}_1 y_1 + \bar{C}_2 y_2 & 0 \leq z < h\end{aligned}\quad (3.44)$$

где y_1, y_2 определяются решениями (3.17), (3.18).

Рассмотрим сначала случай, когда $|p\tau_0 e^{-\alpha z}| < 1$. Тогда y_1 и y_2 определяются (3.18). При $z > H$ $C_2 = 0$ и $\varphi_1 = C_1 y_1$; при $z < h$ $\varphi_2(z = 0) = 0$, откуда следует, что $\bar{C}_1 y_1 + \bar{C}_2 y_2 = 0$. Для определения оставшихся постоянных, используя соотношения (3.40), получим следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}C_1 y_1(H) &= C_3 e^{-xH} + C_4 e^{xH} \\ \left(\lambda_1 + \frac{p}{4\pi}\right) (-x C_3 e^{-xH} + x C_4 e^{xH}) &= C_1 y_1'(H) \left(\lambda(H) + \frac{p}{4\pi}\right) \\ \bar{C}_1 y_1(h) + \bar{C}_2 y_2(h) &= C_3 e^{-xh} + C_4 e^{xh} \\ [\bar{C}_1 y_1'(h) + \bar{C}_2 y_2'(h)] \left(\lambda(h) + \frac{p}{4\pi}\right) &= \\ = \left(\lambda_1 + \frac{p}{4\pi}\right) (-x \bar{C}_3 e^{-xh} + x \bar{C}_4 e^{xh})\end{aligned}\quad (3.45)$$

$$\begin{aligned}\bar{C}_1 &= -\bar{C}_2 \frac{y_2(0)}{y_1(0)}, & C_4 &= \bar{C}_4 - \frac{\hat{I}_1(p) e^{-xz_1}}{x(p + 4\pi\lambda_1)}, \\ C_3 &= \bar{C}_3 + \frac{\hat{I}_1(p) e^{xz_1}}{x(p + 4\pi\lambda_1)}\end{aligned}$$

Решая систему уравнений (3.45), получим для C_1 и \bar{C}_2 выражения:

$$j_{\text{ст}}^z = \frac{I_{\text{ст}}^z}{\pi a^2} [\theta(z - z_n) - \theta(z - z_p)] \quad (3.46)$$

При $|\bar{\eta}(H)| \ll 1$ и $|\bar{\eta}(h)| \ll 1$ для расстояний $r \gg \alpha^{-1}$ ($x/\alpha \ll 1$) соответствующие вычисления дают для C_1 и \bar{C}_2 :

$$C_1 = -\frac{2\hat{I}_1(p)\bar{\eta}(H)\text{sh}x(z_1 - h)}{(p + 4\pi\lambda_1)y_1'(H)\text{sh}x(H - h)} = -\frac{2\hat{I}_1(p)\text{sh}x(z - h)}{\alpha p \text{sh}x(H - h)}$$

$$\bar{C}_2 = \frac{2\hat{I}_1(p)\bar{\eta}(h)\text{sh}x(H - z_1)y_1(0)}{x(p + 4\pi\lambda_1)\text{sh}x(H - h)\bar{\Delta}(h, 0)} = \quad (3.47)$$

$$= \frac{2\hat{I}_1(p)\ln(1 + p\tau_0)\text{sh}x(H - z_1)}{\alpha p \text{sh}x(H - h)}$$

Для потенциала электрического поля получим при $r \gg \alpha^{-1}$:

$$\varphi(r, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma - i\infty}^{\sigma + i\infty} \frac{2\hat{I}_1(p)}{\alpha p} \ln(1 + p\tau_0 e^{-\alpha z}) e^{pt} dp \times$$

$$\times \int_0^\infty \frac{\text{sh}x(z_1 - h)}{\text{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx, \quad z > H$$

$$\varphi(r, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma - i\infty}^{\sigma + i\infty} \frac{2\hat{I}_1(p)}{\alpha p} \ln \frac{1 + p\tau_0}{1 + p\tau_0 e^{-\alpha z}} e^{pt} dp \times$$

$$\times \int_0^\infty \frac{\text{sh}x(H - z_1)}{\text{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx, \quad 0 \leq z < h$$
(3.48)

При $I_1(p) = I_0/p$, вычисляя вертикальную и горизонтальную составляющие напряженности электрического поля, получим:

$$E_z(r, z, t) = 2I_0\tau_0 e^{-\alpha z} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau(z)}}\right) \int_0^\infty \frac{\text{sh}x(z_1 - h)}{\text{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx, \quad (3.49)$$

$$z > H$$

$$E_z(r, z, t) = -2I_0\tau_0 e^{-\alpha z} \left(1 e^{-\frac{t}{\tau(z)}} \right) \int_0^{\infty} \frac{\text{sh}x(H - z_1)}{\text{sh}x(H - h)} J_0(xr) x dx,$$

$$0 \leq z < h$$

$$E_r(r, z, t) = \frac{2I_0}{\alpha} \int_0^t d\tau E_1\left(\frac{\tau}{\tau(z)}\right) \int_0^{\infty} \frac{\text{sh}x(z_1 - h)}{\text{sh}x(H - h)} J_1(xr) x^2 dx,$$

$$z > H$$

$$E_r(r, z, t) = \frac{2I_0}{\alpha} \left[\int_0^t d\tau E_1\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) - \int_0^t d\tau E_1\left(\frac{\tau}{\tau(z)}\right) \right] \times \\ \times \int_0^{\infty} \frac{\text{sh}x(H - z_1)}{\text{sh}x(H - h)} J_1(xr) x^2 dx,$$

$$0 \leq z < h$$

Вычисление внутренних интегралов по переменной x в (3.49) проводится аналогично вычислению интегралов в выражениях (3.15). Необходимо отметить, исходя из анализа формул (3.49), что релаксация E_z и E_r по времени проходит по-разному. Для E_z время установления стационарного значения определяется временем электрической релаксации $\tau(z)$ в месте измерения, в то время как E_r стремится к стационарному значению с характерными временами τ_0 и $\tau(z)$.

При $r \gg \alpha^{-1}$ ($x/\alpha \ll 1$), $\lambda_1 \ll \lambda(h)$, $\lambda_1 \ll \lambda(H)$, $I_1(p) = I_0/p$ вычисления вертикальной составляющей напряженности электрического поля при $z = 0$ дают:

$$\begin{aligned}
E_z|_{z=0} &= -2I_0 \int_0^\infty J_0(xr)xdx \left\{ \int_0^t P(t-\tau)R(\tau)d\tau \right\} = \\
&= -2I_0 \int_0^\infty J_0(xr)xdx \left\{ \int_0^t P(t-\tau) \left\{ \int_0^\tau G_1(\tau-\tau_1)F_1(\tau_1)d\tau_1 \right\} d\tau \right\} \\
F_1(t) &= \tau^{1/2}(h) \left[\frac{e^{-t/\tau(z)}}{\sqrt{\pi t}} + \frac{1}{\tau(h)^{1/2}} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{t}{\tau(z)}} \right], \\
G_1(t) &= \frac{1}{\tau_0} \frac{e^{-t/\tau_0}}{\sqrt{\pi t}}, \tag{3.50}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R(t) &= \int_0^t G_1(t-\tau)F_1(\tau)d\tau, \\
P(t) &= \frac{(Ap_1 + B)e^{p_1 t}}{p_1 - p_2} - \frac{(B + Ap_2)e^{p_2 t}}{p_1 - p_2}, \\
A &= \frac{\operatorname{sh}x(H - z_1) + \operatorname{ch}x(H - z_1)}{\operatorname{sh}xH + \operatorname{ch}xH}, \\
B &= \frac{4\pi\lambda(H)\operatorname{sh}x(H - z_1)}{\operatorname{sh}xH + \operatorname{ch}xH}
\end{aligned}$$

где p_1 и p_2 — корни многочлена второй степени

$$\begin{aligned}
\tilde{S} &= p^2(\operatorname{sh}xH + \operatorname{ch}xH) + \\
&+ p[4\pi\lambda(h)\operatorname{ch}xh(\operatorname{ch}x(H - h) + \operatorname{sh}x(H - h)) + 4\pi\lambda(H)\operatorname{sh}xH] + \\
&+ 16\pi^2\lambda(h)\lambda(H)\operatorname{sh}x(H - h)\operatorname{ch}xh, \\
& p_1 < 0, p_2 < 0
\end{aligned}$$

Характерными временами установления стационарного электрического состояния в рассматриваемом случае являются

времена электрической релаксации $\tau(H)$, $\tau(h)$, τ_0 (предполагается, что $\tau_1 = (4\pi\lambda_1)^{-1}$ достаточно велико).

Можно также в рамках данной задачи рассмотреть начальную стадию динамики установления равновесного состояния, когда имеется место неравенство $|e^{az}/p\tau_0| < 1$. В этом случае для построения решения используются функции y_1 и y_2 из (3.17), а первое уравнение системы (3.45) заменяется на уравнение:

$$C_1 y_1(H) + C_2 y_2(H) = C_1 (y_1(H) - Ay_2(H)) = C_3 e^{-xH} + C_4 e^{xH}$$

$$C_2 = -C_1 \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 - \frac{x}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(1 - \frac{2x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 + \frac{x}{\alpha}\right)} (-1)^{2x/\alpha} = -AC_1 \quad (3.51)$$

Очевидно, что для решения системы уравнений (3.45) с учетом (3.51) надо воспользоваться решением (3.46), где $y_1(H)$ заменяется на $y_1(H) - Ay_2(H)$. При достаточно малых временах ($|p| \gg 1$), когда $|\eta(h)| = |\eta(H)| = 1$, соответствующие вычисления показывают, что решение данной задачи не отличается от решения при $\lambda = \lambda_0 e^{az}$ без скачков электрической проводимости.

3.3 Электрическое поле токового источника, изменяющегося по гармоническому закону

Рассмотрим случай, когда токовый источник совершает гармонические колебания $I_{ct}^z = I_0 e^{i\omega t}$. Пусть частота ω такова, что можно использовать уравнение для потенциала электрического поля, записанного в виде (1.1). Для установившихся гармонических колебаний будем искать решение этого уравнения в следующем виде:

$$\varphi(r, z, t) = \bar{\varphi}(r, z) e^{i\omega t} \quad (3.52)$$

Тогда получим следующее уравнение для образа преобразования Фурье-Бесселя $\hat{\varphi}$ от $\bar{\varphi}$:

$$\frac{d^2 \hat{\varphi}}{dz^2} + \frac{4\pi\alpha\lambda}{i\omega + 4\pi\lambda} \frac{d\hat{\varphi}}{dz} - x^2 \hat{\varphi} = -\frac{2I_0\delta(z - z_1)}{i\omega + 4\pi\lambda} \quad (3.53)$$

$$\hat{\varphi} = \int_0^\infty \bar{\varphi} J_0(xr) r dr \quad \bar{\varphi} = \int_0^\infty \hat{\varphi} J_0(xr) x dx$$

Решение полученного уравнения выражается через гипергеометрические функции (3.17) и (3.18) с заменой параметра p на $i\omega$. Отметим, что здесь возникают два возможных решения в зависимости от соотношения частоты ω и времени электрической релаксации $\tau(z)$. В первом случае, когда $|i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}| < 1$, решение определяется (3.18) и электрический режим колебаний поля в атмосфере зависит от электрической проводимости, причем соотношение между ω и $\tau(z) = (4\pi\lambda(z))^{-1}$ определяет сдвиг фаз между колебаниями токового источника и электрического поля в данной области атмосферы. В предельном случае $|i\omega\tau_0| \ll 1$ колебания поля и тока в источнике происходят синфазно и имеет место квазистационарный режим. В случае, когда выполнено условие $|e^{\alpha z}/i\omega\tau_0| < 1$ вследствие роста экспоненциальной функции, решение при $h(\omega) = \alpha^{-1} \ln \omega\tau_0$ из области $|e^{\alpha z}/i\omega\tau_0| < 1$ переходит в область $|i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}| < 1$. Этот переход осуществляется с помощью формулы (3.19). Схема получения решения данной задачи аналогична схеме решения переходной задачи, которая рассматривалась в п.3.2. Приведем здесь основные результаты решения для этого случая. При $z < z_1$ имеем для $\hat{\varphi}_1$:

$$\hat{\varphi}_1 = \frac{I_0}{i\omega x} \frac{y_1(z_1) - a_2 y_2(z_1)}{a_1 - a_2} \left[e^{i\frac{\pi}{2\alpha}x} e^{-x(h(\omega) - z)} \times \right. \quad (3.54)$$

$$\left. \times F\left(\alpha_1 + \frac{x}{\alpha}, \tilde{\alpha}_1 + \frac{x}{\alpha}, 1 + \frac{2x}{\alpha}, -\frac{e^{\alpha z}}{i\omega\tau_0}\right) - \right.$$

$$-a_1 e^{-i\frac{\pi}{2\alpha}x} e^{x(h(\omega)-z)} F\left(\alpha_1 - \frac{x}{\alpha}, \tilde{\alpha}_1 - \frac{x}{\alpha}, 1 - \frac{2x}{\alpha}, -\frac{e^{az}}{i\omega\tau_0}\right)$$

При $|e^{az_1}/i\omega\tau_0| \ll 1$ соответствующие вычисления дают:

$$a_1 = e^{i\frac{\pi}{\alpha}x} e^{-2xh(\omega)}, \quad a_2 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 - \frac{x}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(1 - \frac{2x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 + \frac{x}{\alpha}\right)} \times$$

$$\times \frac{y_1(z_1) - a_2 y_2(z_1)}{a_1 - a_2} = e^{-i\frac{\pi}{2}\frac{x}{\alpha}} e^{xh(\omega)} \frac{\text{shx}[h(\omega) - z_1 - i\bar{\alpha}_1]}{\text{shx}[h(\omega) - i\bar{\alpha}_1]}$$

$$e^{-2ix\bar{\alpha}_1} = e^{-i\frac{\pi x}{\alpha}} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 - \frac{x}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(1 - \frac{2x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 + \frac{x}{\alpha}\right)} \quad (3.55)$$

$$\hat{\varphi}_1 = \frac{I_0}{i\omega x} \frac{\text{shx}[h(\omega) - z_1 - i\bar{\alpha}_1]}{\text{shx}[h(\omega) - i\bar{\alpha}_1]} \text{shxz}, \quad z < z_1$$

При $z > z_1$ получим для $\hat{\varphi}_2$:

$$\hat{\varphi}_2 = -\frac{I_0}{i\omega x} \frac{\text{shxz}_1}{\text{shx}[h(\omega) - i\bar{\alpha}_1]} \times$$

$$\times \left[\Gamma\left(1 - \frac{2x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 + \frac{x}{\alpha}\right) e^{i\frac{\pi x}{2\alpha}} e^{-x(h(\omega)-z)} \times \right.$$

$$\times F\left(\alpha_1 + \frac{x}{\alpha}, \tilde{\alpha}_1 + \frac{x}{\alpha}, 1 + \frac{2x}{\alpha}, -\frac{e^{az}}{i\omega\tau_0}\right) - \quad (3.56)$$

$$-\Gamma\left(1 + \frac{2x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 - \frac{x}{\alpha}\right) e^{x[h(\omega)-z-i\frac{\pi}{2\alpha}]} \times$$

$$\left. \times F\left(\alpha_1 - \frac{x}{\alpha}, \tilde{\alpha}_1 - \frac{x}{\alpha}, 1 - \frac{2x}{\alpha}, -\frac{e^{az}}{i\omega\tau_0}\right) \right]$$

Если выполнено условие $r \gg \alpha^{-1}$ ($x/\alpha \ll 1$), то вместо (3.56) имеем:

$$\hat{\varphi}_2 = \frac{2I_0}{i\omega x} \frac{\operatorname{sh}xz_1 \operatorname{sh}x[h(\omega) - z - i\bar{\alpha}_1]}{\operatorname{sh}x[h(\omega) - i\bar{\alpha}_1]} \quad z > z_1 \quad (3.57)$$

При этом $\bar{\alpha}_1 = \pi/2\alpha$.
Наконец при $z > h(\omega)$:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_3 = & \frac{2I_0}{i\omega x} \frac{\Gamma^2\left(\alpha_1 + \frac{x}{\alpha}\right) \Gamma^2\left(\alpha_1 - \frac{x}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(1 + \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}\right)} \frac{\operatorname{sh}xz_1 e^{-i\frac{\pi x}{\alpha}}}{\operatorname{sh}x(h(\omega) - i\bar{\alpha}_1)} \times \\ & \times e^{-\alpha\left[(z-h(\omega)-i\frac{\pi}{2\alpha})\right]^{\alpha_1}} \times \\ & \times F\left(\alpha_1 + \frac{x}{\alpha}, \alpha_1 - \frac{x}{\alpha}, 1 + \alpha_1 - \bar{\alpha}_1, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}\right) \end{aligned} \quad (3.58)$$

При $x/\alpha \ll 1$ имеем:

$$\hat{\varphi}_3 = \frac{2I_0}{i\omega\alpha} \frac{\operatorname{sh}xz_1 e^{i\frac{\pi x}{\alpha}}}{\operatorname{sh}x(h(\omega) - i\bar{\alpha}_1)} e^{-\alpha(z-h(\omega))} \frac{\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})}{i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}} \quad (3.59)$$

Переходя от образов преобразования Фурье-Бесселя к оригиналам, получим:

$$\begin{aligned} \varphi_1 = e^{i\omega t} \frac{2I_0}{i\omega} \int_0^\infty \frac{\operatorname{sh}x[h(\omega) - z_1 - i\bar{\alpha}_1]}{\operatorname{sh}x(h(\omega) - i\bar{\alpha}_1)} \operatorname{sh}xz J_0(xr) dx, \quad z < z_1 \\ \varphi_2 = e^{i\omega t} \frac{2I_0}{i\omega} \int_0^\infty \frac{\operatorname{sh}x[h(\omega) - z_1 - i\bar{\alpha}_1]}{\operatorname{sh}x(h(\omega) - i\bar{\alpha}_1)} \operatorname{sh}xz_1 J_0(xr) dx, \quad z > z_1 \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\varphi_3 = e^{i\omega t} \frac{2I_0}{i\omega\alpha} e^{-\alpha(z-h(\omega))} \frac{\ln(1 + i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})}{i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}} \times \\ \times \int_0^\infty \frac{\operatorname{sh}xz_1}{\operatorname{sh}x(h(\omega) - i\bar{\alpha}_1)} J_0(xr) x dx, \quad z > h(\omega)$$

Вычисления вертикальной составляющей напряженности электрического поля при $z = 0$ дают:

$$E_{1z}|_{z=0} \approx -e^{i\omega t} \frac{4\pi I_0}{i\omega H^2(\omega)} \sin \frac{\pi z_1}{H(\omega)} \left(\frac{H(\omega)}{2r} \right)^{1/2} e^{-\frac{\pi r}{H(\omega)}}, \\ r > |H(\omega)| \\ E_{1z}|_{z=0} \approx -e^{i\omega t} \frac{2I_0 z_1}{i\omega (r^2 + z_1^2)^{3/2}} \times \\ \times \left\{ 1 - \frac{(2H(\omega) - z_1)(r^2 + z_1^2)^{3/2}}{z_1 \{r^2 + [2H(\omega) - z_1]^2\}^{3/2}} \right\}, \\ r < |H(\omega)| \quad (3.61)$$

где: $H(\omega) = h(\omega) - i \frac{\pi}{2\alpha}$.

В случае, если частота ω удовлетворяет условию $|i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}| < 1$, решение (3.53) записывается следующим образом:

$$\varphi_1 = \frac{2I_0\tau_0}{\alpha} \int_0^\infty \frac{J_0(xr)x}{\sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2}} e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_1)} \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z_1})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0)} \times \\ \times \left[e^{-\frac{\alpha}{2}(z_1-z)} \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2} \times \right. \\ \times F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0) - \\ \left. - e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_1)} \sqrt{1 + 4x^2/\alpha^2} \times \right. \\ \left. \times F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z}) F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, -i\omega\tau_0) \right] dx \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned}
\varphi_2 = & \frac{2I_0\tau_0}{\alpha} \int_0^{\infty} \frac{J_0(xr)x dx}{\sqrt{1+4x^2/\alpha^2}} e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_1)} \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0)} \times \\
& \times \left[e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_1)} \sqrt{1+4x^2/\alpha^2} \times \right. \\
& \times F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z_1}) F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0) - \\
& \left. - e^{-\frac{\alpha}{2}(z+z_1)} \sqrt{1+4x^2/\alpha^2} \times \right. \\
& \left. \times F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z_1}) F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, -i\omega\tau_0) \right] \\
& z > z_1
\end{aligned}$$

Напряженность электрического поля при $z = 0$ представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
E_z|_{z=0} = & -\frac{2I_0 z_1 e^{i\omega t}}{i\omega 4\pi\lambda} \times \\
& \times \int_0^{\infty} J_0(xr)x \frac{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0 e^{-\alpha z_1})}{F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, -i\omega\tau_0)} e^{-\frac{\alpha z_1}{2}(\sqrt{1+4x^2/\alpha^2}+1)} dx \quad (3.63)
\end{aligned}$$

При $|i\omega\tau_0| \ll 1$ решения (3.62) и (3.63) переходят в решение Хольцера-Саксона с соответствующим домножением φ_1 и φ_2 на $e^{i\omega t}$.

Получим приближенное решение с учетом поправок на частоту. При $|i\omega\tau_0| < 1$ гипергеометрические функции, входящие в (3.62) и (3.63) можно представить с точностью до члена первого порядка малости по $\omega\tau_0$ в следующем виде:

$$\begin{aligned}
F(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \gamma, w) & \approx 1 + \frac{1}{2}w \\
F(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \gamma_1, w) & \approx 1 + \frac{1}{2}w \quad (3.64)
\end{aligned}$$

Тогда решение (3.62) и соответственно φ_1 и φ_2 будут равны:

$$\begin{aligned}
\varphi_{1,2} = I_0 z_1 e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_1)} \left(1 - \frac{1}{2} i \omega \tau_0 e^{-\alpha z_1}\right) \times \\
\times \left(1 - \frac{1}{2} i \omega \tau_0 e^{-\alpha z}\right) e^{i \omega t} \times \\
\times \left[\frac{e^{-\frac{\alpha}{2} \sqrt{(z-z_1)^2 + r^2}}}{\sqrt{r^2 + (z-z_1)^2}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2} \sqrt{(z+z_1)^2 + r^2}}}{\sqrt{r^2 + (z+z_1)^2}} \right] \quad (3.65) \\
z < z_1, \quad z > z_1
\end{aligned}$$

Выражение (3.65) можно переписать в следующем виде:

$$\varphi_{1,2} = \varphi_{\text{ст}} e^{i \omega t} \left[1 - \frac{1}{2} i \omega \tau_0 (e^{-\alpha z} + e^{-\alpha z_1}) - \frac{1}{4} (\omega \tau_0)^2 e^{-\alpha(z+z_1)} \right] \quad (3.66)$$

Второй член в (3.66) определяет сдвиг фаз по отношению к квазистационарным колебаниям, третий член квадратичен по частоте ω , хотя в принципе он мал и им можно пренебречь.

Напряженность электрического поля в соответствии с выражением (3.63) имеет вид:

$$E_z|_{z=0} = E_z^{\text{ст}}|_{z=0} \frac{\left(1 - \frac{1}{2} i \omega \tau_0 e^{-\alpha z_1}\right)}{(1 + i \omega \tau_0) \left(1 - \frac{1}{2} i \omega \tau_0\right)} e^{i \omega t} \quad (3.67)$$

Это выражение можно переписать в следующем виде:

$$E_z|_{z=0} = E_z^{\text{ст}} e^{i \omega t} \frac{\left(1 - \frac{1}{2} i \omega \tau_0 e^{-\alpha z_1}\right) \left(1 + \frac{1}{2} i \omega \tau_0\right) (1 - i \omega \tau_0)}{(1 + \omega^2 \tau_0^2) \left(1 + \frac{1}{4} \omega^2 \tau_0^2\right)} \quad (3.68)$$

В принципе можно показать, используя метод малого параметра, а в данной задаче им является величина $\epsilon = \omega \tau_0$, что учет членов, содержащих ω , дает кулоновские поправки к квазистационарному потенциалу $\varphi_{\text{ст}}$.

Выводы

В настоящей работе представлены расчеты электрических полей, создаваемых точечным и пространственно протяженным зарядовыми источниками с учетом скачков электрической проводимости на границе «плоскопараллельное облако — свободная атмосфера» как в стационарном, так и нестационарном случае. В стационарном случае дано обобщение теории Хольцера—Саксона (Holser, Saxon, 1952) с учетом скачков электрической проводимости на границе «облако — свободная атмосфера» и пространственно протяженного осесимметричного распределения зарядового источника. Получены асимптотические формулы, позволяющие рассчитать напряженности электрических полей в свободной атмосфере в зависимости от расстояния до источника. Как показывают проведенные расчеты, наличие скачка λ приводит к уменьшению поля от источника. Скачок λ приводит к экранировке электрического заряда в облаке с $\lambda = \text{const}$.

В нестационарном случае на основе потенциального приближения получено аналитическое решение задачи, описывающее процесс установления стационарного электрического состояния атмосферы при включении токового источника. Если токовый источник отсутствует, а в атмосфере в некоторый момент времени появился электрический заряд, например, вследствие разрядных процессов, то полученное решение описывает процесс распада этого заряда. Характерной особенностью полученного решения является наличие двух временных стилей $t < \tau_0, t > \tau_0$, где $\tau_0 = (4\pi\lambda_0)^{-1}$ — время электрической релаксации вблизи земной поверхности. Для времен $t \ll \tau_0$ роль электрической проводимости в нижних слоях атмосферы мала и существенную роль играют верхние слои, где $t > \tau_\lambda = (4\pi\lambda)^{-1}$ и стационарное состояние установилось. В этом случае характерное время уменьшения напряженности электрического поля вблизи земной поверхности убывает с увеличением расстояния от оси источника, что вызвано движением вниз границы с $t = \tau_\lambda$. При $t > \tau_0$ процесс установления стационарного электрического состояния в атмосфере определяется ее электрической проводимостью и, как показывают приведенные выше расчеты, временем электрической релаксации $\tau_0, \tau_1, \tau_\lambda(z)$.

Если токовый источник меняется по гармоническому закону, то при $|\omega\tau_0| \ll 1$ будет иметь место квазистационарный режим, а при $|\omega\tau_0| > 1$ — отставание по фазе колебаний напряженности электрического поля при $z = 0$, которое может достигать величины $\pi/2$. Аналогичные результаты получены в статье автора (2018), где таким же свойством обладает и потенциал ионосферы, определяющий глобальное электрическое поле атмосферы.

В дальнейшем необходимо состыковать численную модель электризации с учетом ионного состава атмосферы, т. к. неучет его может приводить к завышенным значениям электрических полей в атмосфере. К тому же скачки λ на границе «облако — свободная атмосфера», приводят к формированию двойного слоя, который сам является генератором электрического поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бейтмен Г., Эрдейн А.* (1973). Высшие трансцендентные функции. Гипергеометрическая функция, функция Лежандра. — М.: Наука. 294 с.
- Джексон Дж.* (1965). Классическая электродинамика. — М: Мир. 702 с.
- Диткин В. А., Прудников А. П.* (1974). Интегральные преобразования и операционное исчисление. — М.: Наука. 542 с.
- Градштейн И. С., Рыжик И. М.* (1971). Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: Наука. 1108 с.
- Камке Э.* (1971). Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М.: Наука. 576 с.
- Морозов В. Н.* (2018). Вариации электрического поля атмосферы, обусловленные гармоническими вариациями токов грозových генераторов в модели глобальной электрической цепи в атмосфере.// Труды ГГО. Вып. 591. С. 92—104.
- Browning G. L., Tzur I., Roble R. G.* (1987). A global time-dependent model of thunderstorms electricity. Part I: Mathematical properties of the physical and numerical models // J. Atm. Sci. V. 44. № 15. P. 2166—2177.
- Hager W. W., Nisbet J. S., Kasha J. R., Wei-Chang Shann.* (1989). Simulations of Electric Field within a Thunderstorm // J. Atm. Sci. V. 46. № 23. P. 3542—3558.
- Holser 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.

Illingworth A. J. (1972). Electric field recovery after lightning as the response of the conducting atmosphere to a field change // *Quart. J. Meteor. Soc.* V. 98. № 417. P. 604—616.

Kasimir H. W. (1959). Das Gewittergenerator im luftelektrischen Stromkreis I // *Zeitsch.für Geophys.* V. 25. № I. P. 33—64.

Mann J. J. (1970). Interaction of thunderstorm with conducting atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 75. № 9. P. 1697—1698.

Michnowski S. (1973). Electric field variations in a medium with variable conductivity, produced by a point charge above a conductive plane 10. Mann J.J. Interaction of thunderstorm with conducting atmosphere // *Acta geophys. Polonica.* V. 21. № 4. P. 305—329.

Phillips B. B. (1967). Ionic equilibrium and the electrical conductivity in thunderstorms // *Mon. Weath. Rev.* V. 95. P. 854—862.

Tzur I., Roble R. G. (1985). Interaction of a Dipolar Thunderstorm with it's Global Electrical Enviroment // *J. Geophys. Res.* V. 90. № D4. P. 5989—5999.

Volland H. (1984). *Atmospheric Electrodynamics* — Berlin: Springer. 205 p.

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОБНАРУЖЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
ДУМЯ ДОПЛЕРОВСКИМИ РАДИОЛОКАТОРАМИ
НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

*К. Л. Восканян, И. С. Заморин, С. В. Крюкова, А. Д. Кузнецов,
О. С. Сероухова, Т. Е. Симакина, А. С. Солонин*

Российский государственный гидрометеорологический университет
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98
E-mail: tatiana.simakina@gmail.com,
serouhova@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.03.2019
Поступила после доработки 18.04.2019

Введение

В настоящее время в нашей стране происходит смена некогерентных метеорологических локаторов, устаревших как физически, так и морально, и полностью выработавших свой технический ресурс, доплеровскими радиолокационными станциями (ДМРЛ). ДМРЛ, кроме радиолокационной отражаемости, способен измерять еще пять параметров сигнала, отраженного гидрометеорами, что является ценным источником метеорологической информации в режиме реального времени. Объединение информации нескольких ДМРЛ позволяет отслеживать эволюцию опасных конвективных явлений с необходимым пространственно-временным масштабом, эффективно решать задачи штормооповещения, измерения осадков на площади, контролировать активные воздействия на облака. (Тарабукин, 2017; Восканян и др., 2013; Дивинский и др., 2015а; Колбин и др., 2017, 2018; Капустин и др., 2018; Жуков и др., 2018).

В работе Л. И. Дивинского с соавторами (2015б) выполнен анализ возможностей радиолокационного обнаружения осадков и распознавания облачности по данным ДМРЛ, расположенного в аэропорту Пулково города Санкт-Петербурга.

В настоящей работе ставится цель дать сравнительную характеристику способности обнаружения опасных явлений погоды (ОЯП) — гроз и ливней — двумя доплеровскими МРЛ, обслуживающими Ленинградскую область. Были вычислены вероятности обнаружения ОЯП на основе сопоставления синхронных радиолокационных и станционных наблюдений на территории, ограниченной радиусом 150 км от ДМРЛ.

Материалы и методы

Доплеровские локаторы установлены в Санкт-Петербурге: ДМРЛ METEOR 500С в Пулково и METEOR 50DX на крыше здания РГГМУ по адресу Малоохтинский пр., 98. Их местоположение на карте Санкт-Петербурга показано на рис. 1. Географические координаты ДМРЛ составляют: $\varphi = 59,92$, $\lambda = 30,41$ (РГГМУ, METEOR 50DX), $\varphi = 59,79$, $\lambda = 30,26$ (Пулково, METEOR 500С), технические характеристики представлены в табл. 1.



Рис. 1. Местоположение двух ДМРЛ.

Основными отличиями двух сравниваемых ДМРЛ являются длина волны, импульсная мощность, поляризация и наличие или отсутствие городской застройки. Расположение ДМРЛ METEOR 50DX (РГГМУ) в черте городской застройки может приводить к «закрытию» определенных секторов обзора высотными сооружениями.

Таблица 1

Сравнение технических характеристик двух ДМРЛ

| Техническая характеристика | ДМРЛ «METEOR 50DX» | ДМРЛ «METEOR 500С» |
|---|--|---------------------------------|
| Частота передатчика, ГГц | 9,485 ($\lambda \approx 5$ см) | 5,640 ($\lambda \approx 3$ см) |
| Тип передатчика | Магнетрон | Магнетрон |
| Максимальная импульсная мощность, кВт | 63 | 229 |
| | 150 | |
| Дальность обнаружения, км | (250 с измененными параметрами сканирования) | 250 |
| Поляризация | Двойная | Одинарная |
| Диаграмма направленности антенны, град. | 1 | 1 |
| Диаметр антенны, м | 2,4 | 6,7 |
| Высота установки антенны, м | 27 | 30 |
| Городская застройка | имеется | отсутствует |

В комплекс двух ДМРЛ входит одинаковое программное обеспечение «Метеоячейка», что упрощает проведение сопоставления получаемых с их помощью данных (Автоматизированные метеорологические..., 2007). Пример карт метеоявлений, сформированных ДМРЛ Пулково и РГГМУ, представлен на рис. 2а и 2б соответственно.

На рис. 2в отмечены десять метеорологических наземных станций, на основе данных наблюдений которых проводилась валидация результатов работы ДМРЛ, а в табл. 2 — координаты этих станций.

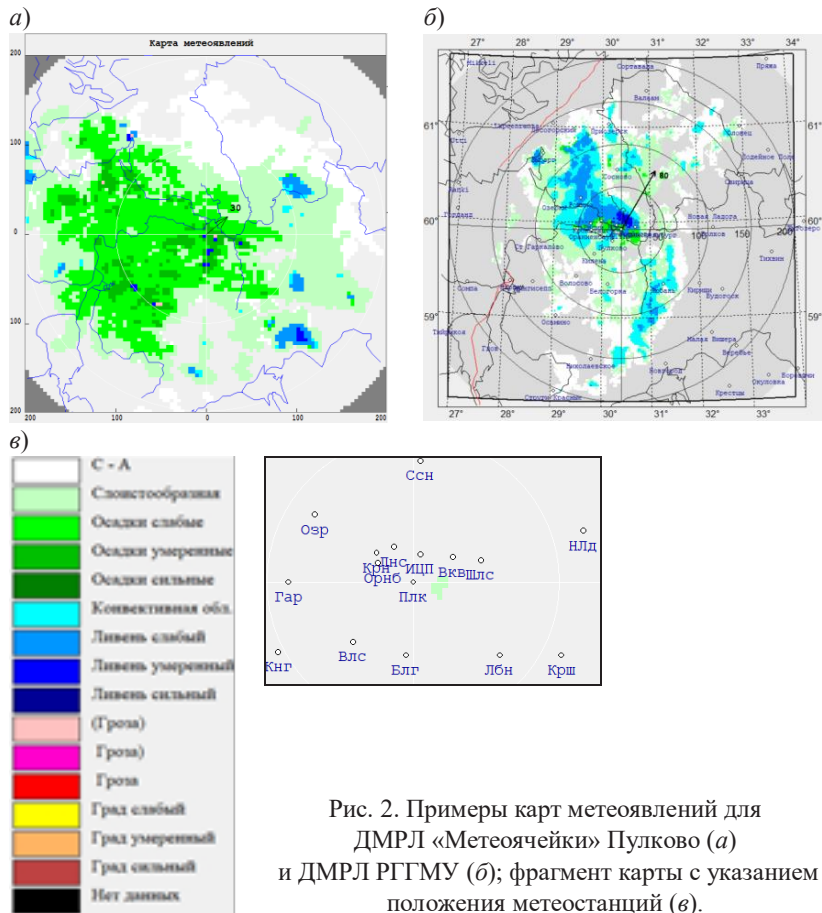


Рис. 2. Примеры карт метеоявлений для ДМРЛ «Метеоячейки» Пулково (а) и ДМРЛ РГГМУ (б); фрагмент карты с указанием положения метеостанций (в).

С карт, полученных двумя радиолокаторами с помощью автоматизированных метеорологических радиолокационных комплексов ДМРЛ — «Метеоячейка», снимались данные об осадках и грозах в пунктах расположения наземных метеорологических станций. Методика получения таких карт подробно рассмотрена в работе (Автоматизированные метеорологические..., 2007). Для валидации радиолокационные данные сравнивались с результатами

наземных наблюдений, с методикой получения которых можно ознакомиться в работах (Наставление..., 1985, 2001).

Таблица 2

Станции, используемые для валидации

| № | Станция | Географические координаты | |
|----|--------------|---------------------------|---------|
| | | Широта | Долгота |
| 1 | Кронштадт | 60,00 | 29,75 |
| 2 | Шлиссельбург | 59,93 | 31,04 |
| 3 | Белогорка | 59,35 | 30,13 |
| 4 | Волосово | 59,45 | 29,51 |
| 5 | Любань | 59,34 | 31,23 |
| 6 | Сосново | 60,56 | 30,23 |
| 7 | Кингисепп | 59,38 | 28,61 |
| 8 | Кириши | 59,45 | 32,02 |
| 9 | Новая Ладога | 60,10 | 32,30 |
| 10 | Выборг | 60,71 | 28,76 |

Сравнивались грозы и ливни за два летних периода, при этом было рассмотрено 2100 сроков с ОЯП.

Для сопоставления радиолокационной информации с данными наземных метеорологических станций принимались следующие условия:

— ливни и грозы считались обнаруженными ДМРЛ, если они наблюдались в радиусе 15 км вокруг станции и подтверждались данными визуальных наблюдений;

— время регистрации ливней и гроз на метеостанции отличалось от срока радиолокационного наблюдения не более чем на 20 мин.

Качество результатов интерпретации радиолокационных наблюдений оценивалось по следующим показателям (Fitzpatrick, 2013; Павлюков и др., 2016):

— оправдываемости обнаружения P_O и вероятности пропуска ОЯП доплеровским МРЛ;

— достоверности обнаружения P_D и вероятности «ложной тревоги» ОЯП доплеровским МРЛ.

Показатели были рассчитаны по следующим формулам:

$$P_O = \frac{N_{MC/DMPL}}{N_{MC}} \cdot 100 \%,$$

где P_O — вероятность обнаружения с помощью ДМРЛ гроз / ливней, измеренных на метеостанции (МС);

$N_{MC/DMPL}$ — количество гроз / ливней, зафиксированных станцией и совпавших с грозами / ливнями по ДМРЛ;

N_{MC} — количество случаев гроз / ливней по данным МС.

За 100 % принимается число наблюдений на МС.

$$P_{II} = 100 \% - P_O,$$

где P_{II} — вероятность пропуска гроз / ливней локатором.

$$P_D = \frac{N_{DMPL/MC}}{N_{DMPL}} \cdot 100 \%,$$

где P_D — вероятность подтвержденных наблюдателем МС гроз / ливней, отмеченных на ДМРЛ;

$N_{DMPL/MC}$ — количество случаев гроз / ливней по ДМРЛ, подтвержденных грозами / ливнями по станции;

N_{DMPL} — количество случаев гроз по ДМРЛ.

За 100 % принимается число наблюдений гроз / ливней по ДМРЛ.

$$P_{ЛТ} = 100 \% - P_D,$$

где $P_{ЛТ}$ — вероятность «ложных тревог» (ЛТ).

Результаты валидации

Результаты вычисления вероятностей оправдываемости и достоверности регистрации гроз и ливней представлены на рис. 3. Точки на диаграммах имеют в качестве координат значения соответствующих вероятностей обнаружения разными локаторами: по оси абсцисс — данные ДМРЛ Пулково, по оси ординат — РГГМУ. Биссектриса на диаграммах определяет линию совпадения вероятностей. Нахождение точек ниже линии соответствует более высоким значениям показателя по данным Пулково, чем РГГМУ. Если точки выше линии — вероятность обнаружения выше у локатора РГГМУ.

Как видно из диаграмм, оправдываемость обнаружения гроз и ливней двумя локаторами находится в диапазоне 0,55—0,9, за исключением станции в Новой Ладоге, где оправдываемость обнаружения ливней локатором РГГМУ составила 0,35. Достоверность обнаружения гроз обоими ДМРЛ колеблется в интервале 0,5...1, осадков — 0,6...0,8.

В целом вероятности обнаружения ОЯП выше у ДМРЛ METEOR 500С в Пулково. Для показателя оправдываемости ливней (рис. 3а) его преимущество однозначно: на четырех станциях значения вероятностей двух локаторов совпали, на остальных пяти — у Пулковского выше. Также преимущество ДМРЛ в Пулково прослеживается при расчете достоверности гроз (рис. 3б): за исключением одной станции, все цифры выше или равны аналогичному показателю РГГМУ. Следовательно, ДМРЛ METEOR 50DX чаще пропускает ливни и дает сигнал «ложной тревоги» о грозе, чем METEOR 500С.

Что касается оправдываемости гроз (рис. 3б) и достоверности ливней (рис. 3в), тут преимущество METEOR 500С не такое явное: при одном совпадении на трех станциях выше значения у РГГМУ, на пяти — у Пулково. Компактность распределения точек на диаграммах свидетельствует о разбросе значений на различных станциях. Можно отметить меньшую дисперсию вероятностей при расчете оправдываемости гроз и достоверности ливней.

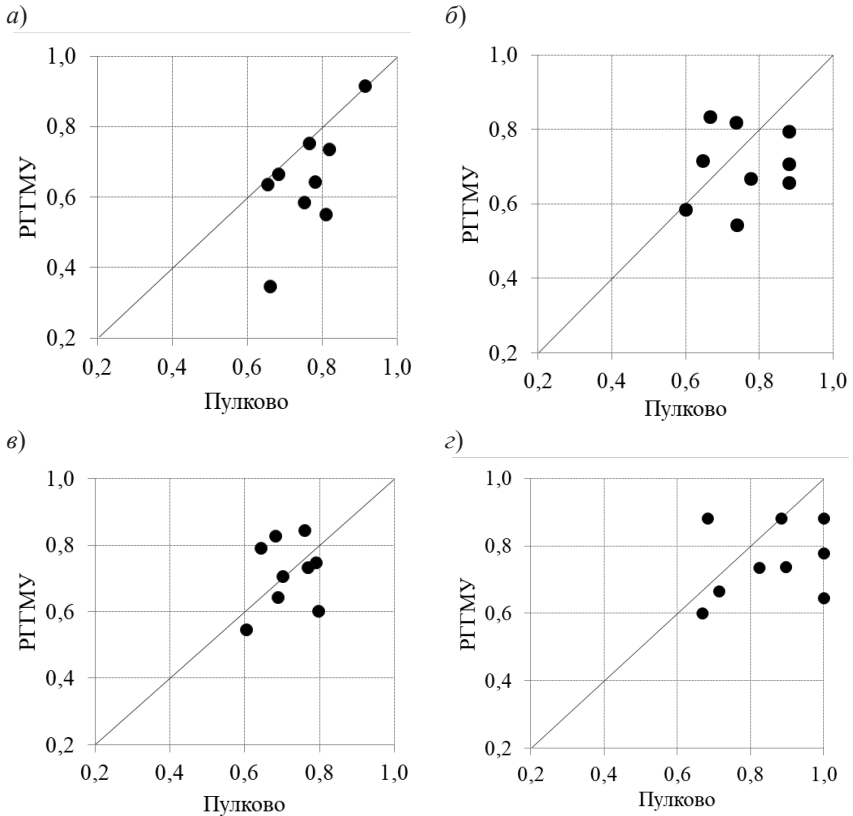


Рис. 3. Сравнение оправдываемости ливней (а) и гроз (б), достоверности ливней (в) и гроз (г) по данным ДМРЛ METEOR 500С Пулково и METEOR 50DX РГГМУ.

Среднемесячные значения вероятностей по всем станциям представлены на рис. 4. По этим диаграммам видно, что оправдываемость обнаружения как ливней, так и гроз выше у пулковского лоатора. Месяцы сезона не оказывают заметного влияния на точность работы ДМРЛ.

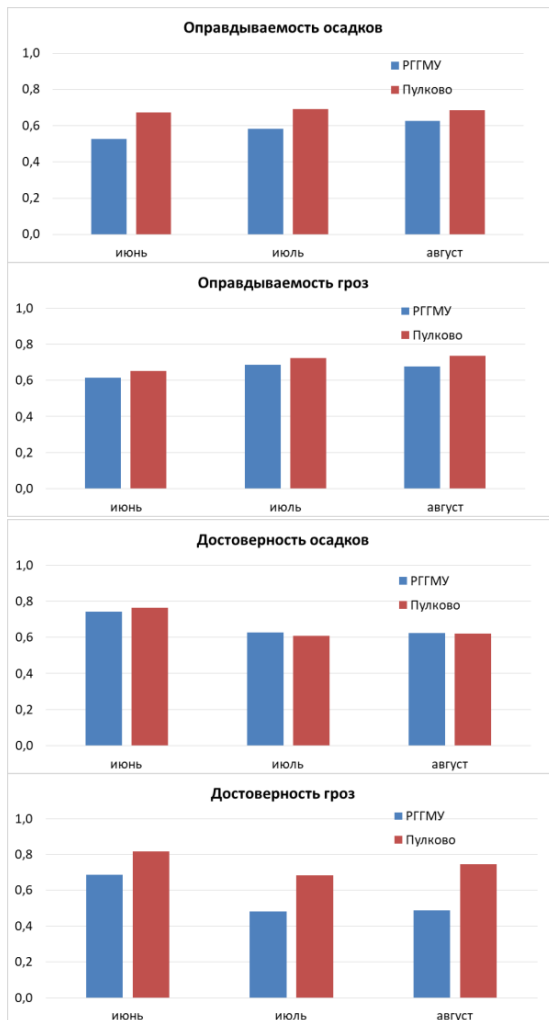


Рис. 4. Оправдываемость и достоверность гроз и ливней по данным ДМРЛ МЕТЕОР 500С Пулково и МЕТЕОР 50DX РГГМУ.

В среднем значения оправдываемости ливней двумя ДМРЛ отличаются на 11 %, гроз — на 5 %. Достоверность обнаружения гроз

пулковским локатором выше в среднем на 25 %, поэтому вероятность «ложной тревоги» ниже, чем по данным локатора РГГМУ. Достоверность обнаружения ливней примерно одинакова у двух локаторов, отличия составили в среднем 1 %.

Далее выполнена оценка влияния удаленности метеоявления от локаторов. На графиках рис. 5 и 6 показано распределение значений оправдываемости и достоверности гроз и ливней по метеостанциям, расположенным на разных удалениях от ДМРЛ — от 0 до 140 км. Количественно зависимость показателей точности от удаленности была отражена коэффициентами корреляции, представленными в табл. 3.

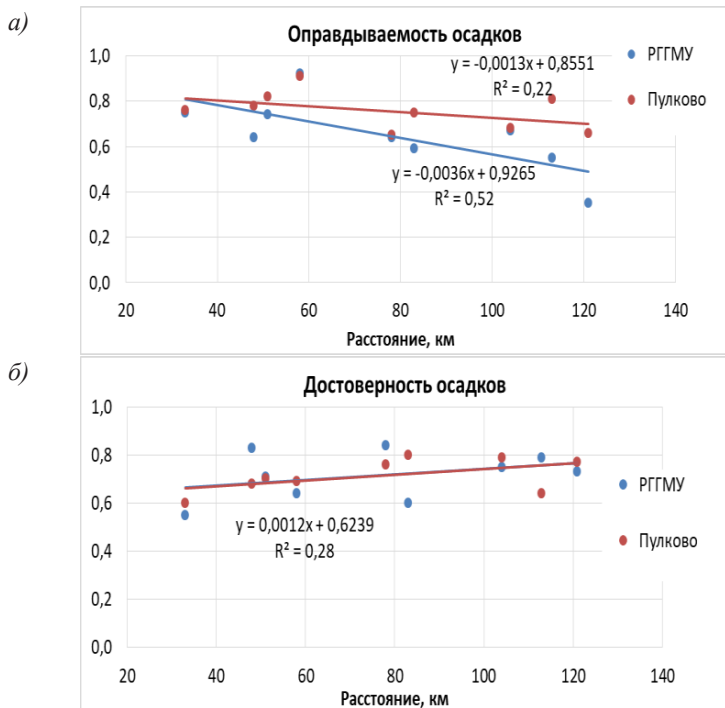


Рис. 5. Зависимость оправдываемости (а) и достоверности (б) ливней от расстояния станции от ДМРЛ.

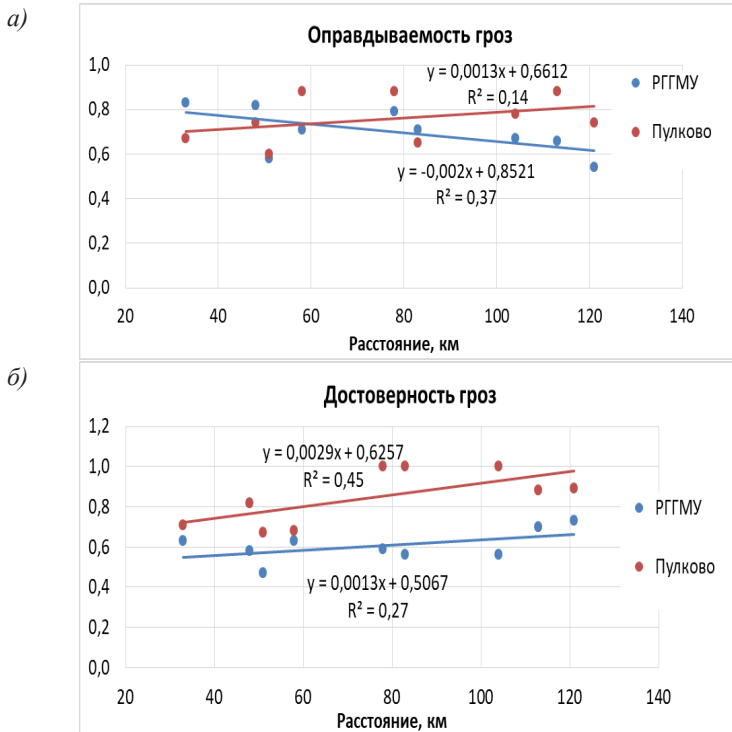


Рис. 6. Зависимость оправдываемости (а) и достоверности (б) гроз от расстояния станции от ДМРЛ.

Линии тренда оправдываемости ДМРЛ МЕТЕОР 50DX РГГМУ (рис. 5а и 6а) демонстрируют незначительное снижение значений с удалением метеостанции от ДМРЛ, что можно объяснить уменьшением разрешающей способности ДМРЛ и ослаблением радиолокационного излучения. Коэффициент корреляции между показателями P_O ливней и гроз для ДМРЛ РГГМУ составил $-0,72$ и $-0,61$ соответственно (см. табл. 3).

Оправдываемость ДМРЛ МЕТЕОР 500С в Пулково ведет себя не так однозначно: наблюдается небольшой рост значений оправдываемости обнаружения гроз с расстоянием.

Аналогичную картину демонстрирует достоверность (рис. 5б и 6б): как для гроз, так и для ливней достоверность двух локаторов увеличивается с расстоянием, причем наиболее заметно — достоверность гроз по данным Пулково (рис. 6б). Корреляция в этом случае составила 0,66 (см. табл. 3). Судя по линии регрессии, на расстоянии 120 км от Пулково вероятность «ложной тревоги» сократится до нуля. В работе Ю. Б. Павлюкова и др. (2016) аналогичный результат объясняется тем, что несмотря на ослабление радиоизлучения и ухудшение разрешения с расстоянием для реально существующих гроз эти эффекты не оказывают столь сильного влияния, и реальные грозы идентифицируются с помощью ДМРЛ правильным образом.

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции

| | Удаленность МС от ДМРЛ | Количество случаев с осадками или грозами | Удаленность МС от ДМРЛ | Количество случаев с осадками или грозами |
|--------------|----------------------------|--|---------------------------|--|
| | <i>METEOR 500C Пулково</i> | | <i>METEOR 50DX ПГМУ</i> | |
| P_O ливней | -0,47 | -0,81 | -0,72 | -0,20 |
| P_O гроз | 0,37 | 0,39 | -0,61 | -0,20 |
| P_D ливней | 0,53 | 0,56 | 0,36 | 0,51 |
| P_D гроз | 0,66 | 0,51 | 0,52 | 0,79 |

Установлена также зависимость показателей эффективности обнаружения ОЯП от количества случаев с осадками и грозами: рост таких случаев совпадает с увеличением достоверности и уменьшением оправдываемости ливней.

В табл. 3 также приведены результаты количественного анализа корреляционной связи оправдываемости и достоверности ливней / гроз и количества случаев с осадками и грозами. Замечено сильное влияние этого фактора на оправдываемость обнаружения ливней локатором METEOR 500C Пулково (-0,81); для данных

МЕТЕОР 50DX РГГМУ такой связи нет. Отрицательный коэффициент корреляции говорит о том, что чем чаще станция фиксирует ливень и грозу, тем больше пропускает ДМРЛ.

Достоверность обнаружения гроз и ливней возрастает с повышением количества случаев с осадками и грозами (наибольший коэффициент для гроз по данным МЕТЕОР 50DX РГГМУ равен 0,79). Положительное значение коэффициента корреляции свидетельствует об уменьшении «ложной тревоги» локатора с повышением грозовой и ливневой активности на станции.

Зависимость вероятностей обнаружения гроз и ливней от направления от ДМРЛ отражена на диаграммах рис. 7 и 8.

Наибольшие отличия в показателях двух локаторов наблюдаются в северо-западном секторе (оправдываемость ливней и гроз) и северном (достоверность).

Чем более далеки от окружности диаграммы рис. 7 и 8, тем менее изотропно пространственное распределение показателей качества по исследуемой территории. Иллюстрация этого эффекта представлена на рис. 9.

Рис. 9а отражает изолинии максимальных вероятностей «ложной тревоги» гроз по данным ДМРЛ Пулково. Значение такой вероятности составляет от 30 до 32 % и занимает округлую область небольшой площади (заштрихованный овал, ограниченный изолинией 0,3) на юго-востоке Санкт-Петербурга. «Ложные тревоги» гроз локатора РГГМУ фиксируются значительно чаще (на рис. 9б выделены изолинии от 0,42 до 0,48) и занимают большую площадь — всю западную и юго-западную части Ленинградской области. Увеличение «ложных тревог» в западном—юго-западном секторе радиолокационного обзора связано, по-видимому, с наиболее частым приходом фронтальной конвекции с этого направления.

ДМРЛ в Пулково пропускает грозу реже (на рис. 9в максимальные значения 30—35 % против 42—64 % для ДМРЛ РГГМУ на рис. 9г), но шире по площади. Рост пропусков замечен с увеличением расстояния от локатора на север Ленинградской области.

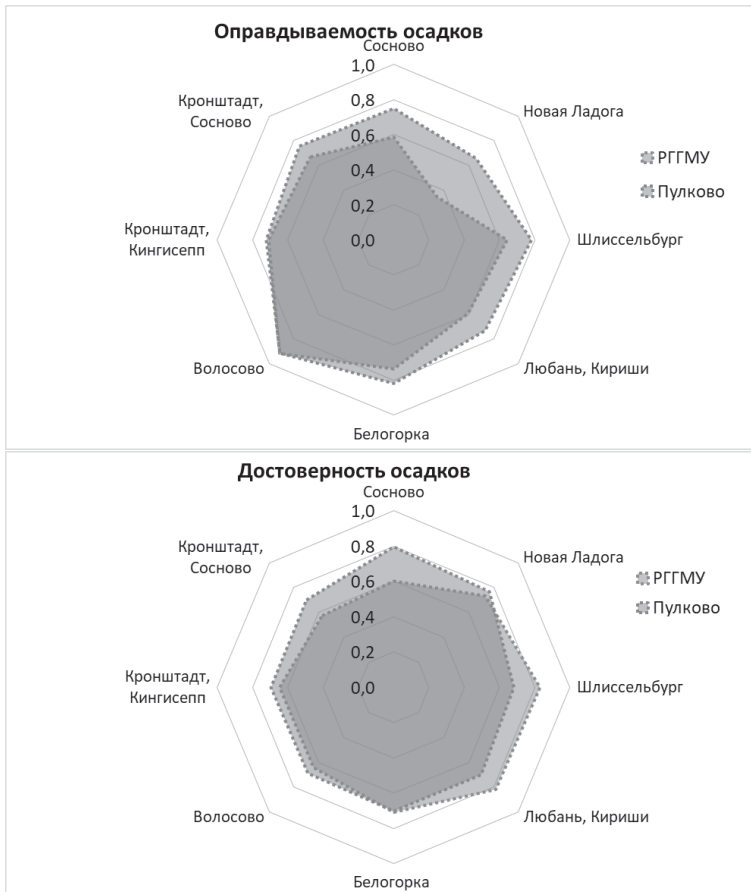


Рис. 7. Зависимость вероятностей обнаружения ливней от азимута метеоявления.

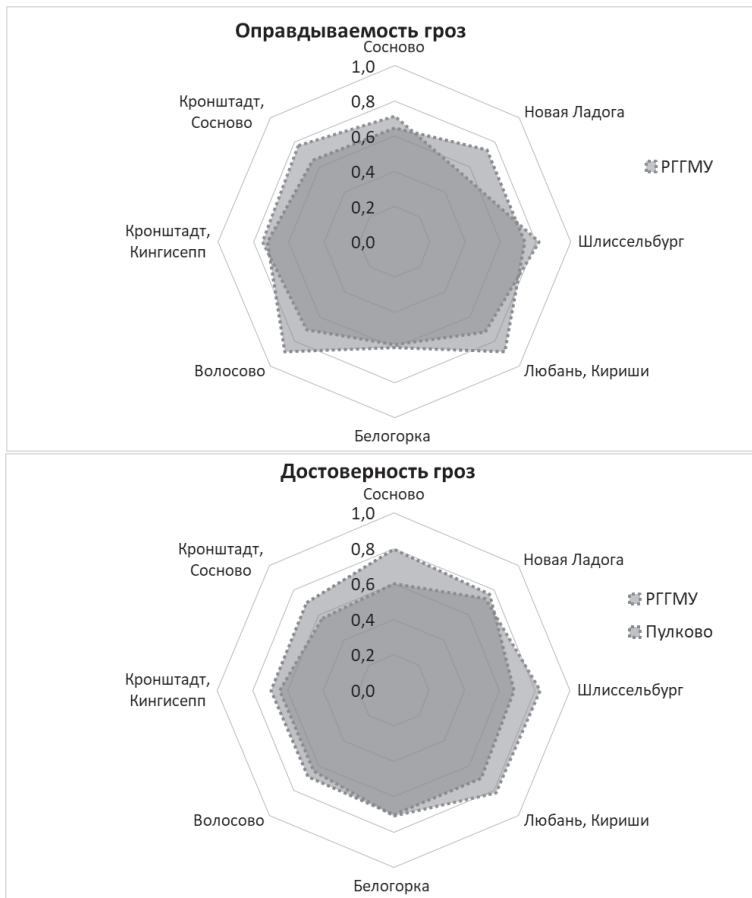


Рис. 8. Зависимость вероятностей обнаружения гроз от азимута метеоявления.

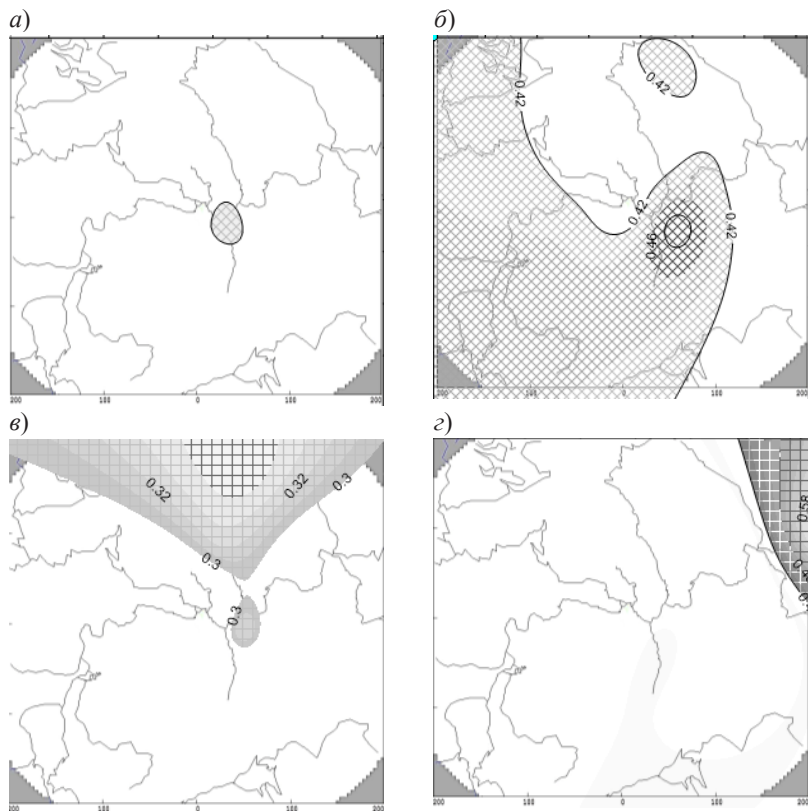


Рис. 9. Пространственное распределение вероятности «ложной тревоги» гроз ДМРЛ МЕТЕОР 500С Пулково (а) и МЕТЕОР 50DX PГТМУ (б), вероятности пропуска гроз Пулково (в) и PГТМУ (з).

Заключение

В результате сравнительного анализа массива радиолокационных обзоров двух ДМРЛ с наблюдениями на десяти метеостанциях за два летних периода можно сделать следующие выводы.

Оправдываемость обнаружения гроз и ливней двумя локаторами находится в диапазоне 0,55—0,9, за исключением района расположения станции в Новой Ладого, где оправдываемость

обнаружения осадков локатором РГГМУ составила всего 0,35. Достоверность обнаружения гроз обоими ДМРЛ колеблется в интервале 0,5...1, осадков — 0,6...0,8.

Построенные поля распределения показателей «ложной тревоги» и пропуска гроз позволили локализовать территории с превышением значений этих показателей.

Оценка влияния удаленности метеоявления от локаторов на оправдываемость демонстрирует незначительное снижение этого параметра с ростом удаленности для ДМРЛ РГГМУ, тогда как для ДМРЛ Пулково наблюдается небольшой рост значений оправдываемости обнаружения гроз с расстоянием.

Достоверность обнаружения гроз и ливней с помощью двух локаторов растет с увеличением расстояния.

Анализ корреляционной связи оправдываемости и достоверности ливней / гроз с удаленностью и количеством случаев с осадками и грозами для рассмотренных пунктов сравнения показал неоднозначный характер такой связи.

Рассмотрение зависимости вероятностей обнаружения гроз и ливней от направления от ДМРЛ показало наибольшие отличия для двух локаторов в северо-западном секторе (оправдываемость осадков и гроз) и северном (достоверность).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка» (2007) / Под ред. Н. В. Бочарникова, А. С. Солонина. — СПб: Гидрометеиздат. 236 с.

Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Солонин А. С. (2013). К вопросу о методике радиолокационного измерения интенсивности атмосферных осадков // Ученые записки РГГМУ. № 27. С. 63—70.

Дивинский Л. И., Кузнецов А. Д., Латонин М. М., Сероухова О. С. (2015а). Верификация обнаружения осадков доплеровским метеорологическим радиолокатором // Ученые записки РГГМУ. № 38. С. 87—92.

Дивинский Л. И., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Солонин А. С., Симакина Т. Е. (2015б). К вопросу об обнаружении облачности и осадков по данным доплеровского метеорологического радиолокатора // Ученые записки РГГМУ. № 39. С. 87—98.

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

Капустин А. В., Колбин В. А., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. (2018). Оценка продолжительности осадков по радиолокационным характеристикам конвективной облачности // Труды ГГО. Вып. 589. С. 114—124.

Колбин В. А., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., Солонин А. С. (2017). Некоторые результаты исследования процесса слияния конвективных ячеек над территорией Ленинградской области // Труды ГГО. Вып. 587. С. 47—55.

Колбин В. А., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., Солонин А. С. (2018). Валидация данных об опасных явлениях погоды, полученных доплеровским радиолокатором // В сб.: Материалы V всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Часть II. — СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского. С. 64—67.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам (1985). Выпуск 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях. — Л.: Гидрометеиздат. 301 с.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам (2001). Выпуск 3. Часть II. Обработка материалов метеорологических наблюдений. — СПб: Гидрометеиздат. 90 с.

Павлюков Ю. Б., Серебрянник Н. И., Карнов Б. Н. (2016). Валидация радиолокационных наблюдений опасных явлений погоды на сети ДМРЛ по данным наземной наблюдательной сети Росгидромета // Труды МФТИ. Том 8. № 1. С. 27—44.

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

Noel Fitzpatrick (2013). Verification of Met Éireann Weather Radar // Met Éireann Technical Note. № 62. P. 1—26.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ МЕТОДИК
В ЛАБОРАТОРИЯХ СЕТИ МОНИТОРИНГА
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ РОСГИДРОМЕТА**

Е. В. Ковачева, О. П. Шарикова, И. Г. Гуревич

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: kovach@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 14.02.2019
Поступила после доработки 25.03.2019

Введение

ФГБУ «ГГО» как базовая организация метрологической службы Росгидромета осуществляет организационно-методическое руководство работами по обеспечению единства измерений при наблюдениях за загрязнением атмосферного воздуха, разработку методик измерений и их внедрение.

С 2015 года на сети мониторинга загрязнения атмосферного воздуха (МЗА) Росгидромета внедрены новые, разработанные в ФГБУ «ГГО», методики измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Важнейшим элементом оценки качества этих методик является анализ достоверности наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха после их внедрения.

Со времени разработки методик измерений концентраций загрязняющих примесей в атмосферном воздухе, представленных в Руководстве по контролю загрязнения атмосферы (РД 04.186-89), прошло более 25 лет. За это время ФГБУ «ГГО» накопило большой методический опыт их практического применения в оперативных подразделениях сети мониторинга загрязнения атмосферы (МЗА) Росгидромета.

Необходимость пересмотра методик, представленных в РД 04.186-89, была связана с изменением требований к оценке и представлению метрологических характеристик, а также к организации и проведению внутрилабораторного контроля качества измерений. Указанные требования сформулированы в нормативных документах:

— ГОСТ Р ИСО 5725-1-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений;

— ГОСТ Р 8.563-2009 ГСИ. Методики (методы) измерений;

— ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий;

— РМГ 61-2010 ГСИ. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки;

— РМГ 76-2014 ГСИ. Внутренний контроль качества результатов количественного химического анализа.

Разработка новых редакций методик измерений проводилась с учетом имеющихся методических наработок, а также новых средств измерений, реактивов и лабораторного оборудования, вошедших в практику химического анализа. За период, прошедший со времени разработки РД 04.186-89, на сети Росгидромета были внедрены сухие газовые счетчики, новые типы генераторов газовых смесей, фотоколориметров, весов, государственных стандартных образцов (ГСО) и сорбционные трубки СТ 412.

Цель настоящей работы — представление результатов внедрения новых методик на сети МЗА.

Общая характеристика методик определения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

В соответствии с приказами Росгидромета (№ 493 от 04.09.2014 г. и № 46 от 02.02.2016 г.) на сети МЗА Росгидромета были введены в действие руководящие документы РД 52.04.791-2014, РД 52.04.792-2014, РД 52.04.793-2014, РД 52.04.794-2014, РД 52.04.822-2015, РД 52.04.795-2014, РД 52.04.799-2014, РД 52.04.823-2015,

РД 52.04.824-2015, содержащие новые методики измерений массовых концентраций **аммиака, диоксида азота, хлорида водорода, диоксида серы, сероводорода, фенола и формальдегида**. Внедрение методик проходило с 1 июля 2015 года и с 10 октября 2016 года.

В новых методиках существенно переработан раздел 14 «Контроль точности измерений», в котором учтена специфика фотометрического анализа атмосферного воздуха в части требований к контролю точности измерений и метрологическим характеристикам методик. В частности, оценены показатели метрологических характеристик, и на их основе установлены нормативы контроля для стадии анализа отобранных из атмосферного воздуха проб, соблюдение которых является необходимым условием получения результатов анализа с установленными для методики показателями метрологических характеристик.

Содержащиеся в РД 04.186-89 рекомендации по внутрилабораторному контролю (важнейшему в разделе «Контроль точности измерений») не отвечали современным требованиям, а приведенные метрологические характеристики методик были оценены и выражены в соответствии с утратившими актуальность МИ 1317-86.

Это не позволяло в полном объеме обеспечить соблюдение современных требований к организации метрологического обеспечения методик выполнения измерений. Так, в старых методиках показатель точности был приведен в виде предела погрешности результата измерений, но отсутствовали показатели прецизионности, как в условиях повторяемости, так и в условиях воспроизводимости. Кроме того, в методиках РД 04.186-89 не учитывалось, что при использовании в качестве средства контроля не газо-воздушных смесей (ПГС — поверочные газовые смеси), а имитации уже отобранных проб (контрольных растворов) необходимо применять другие значения нормативов контроля.

В новых методиках применены два вида контроля качества измерений: по ПГС и по контрольным растворам. Для каждого вида контроля приведены соответствующие значения нормативов. Особенностью второго вида контроля является то, что значения нормативов не учитывают погрешности отбора и хранения проб.

Контроль качества измерений на сети МЗА

Для обеспечения достоверности и качества информации о загрязнении атмосферы ФБГУ «ГГО», как головная организация Росгидромета в области МЗА, осуществляет научно-методическое руководство наблюдательной сетью. Эта работа включает в себя непрерывное взаимодействие со 153 лабораториями мониторинга загрязнения атмосферного воздуха (ЛМЗА), проводимое в форме консультаций, переписки, обмена материалами и образцами контроля (ОК). Специалисты ФБГУ «ГГО» выполняют регулярный контроль деятельности ЛМЗА, включающий анализ и оценку качества работы наблюдательных подразделений на основе проведения внешнего контроля качества их работы.

Внешний контроль качества измерений на сети МЗА проводится по семи **примесям: аммиак, диоксид азота, диоксид серы, сероводород, фенол, формальдегид, хлорид водорода**. За год для сети МЗА удается провести внешний контроль на 2—3 примеси. Образцы контроля с заданными концентрациями примесей ФБГУ «ГГО» изготавливает и рассылает в сетевые ЛМЗА. Каждый ОК помещается в полихлорвиниловые трубки и упаковывается для рассылки в ЛМЗА со специально разработанной инструкцией для анализа ОК в ЛМЗА. Ежегодно изготавливается до 300 ОК, проводится качественный и количественный анализ на содержание заданного вещества в приготовленной серии ОК, а также оценка погрешности ОК. Ответы из ЛМЗА с результатами измерения концентраций в ОК поступают и анализируются в ФБГУ «ГГО», при этом оценивается качество измерений и точность измерений заданных концентраций.

В качестве критерия соответствия результатов измерений заданной точности принят норматив точности (правильности) K , вычисляемый для заданного уровня концентрации (мкг в пробе).

Результаты измерений признаются удовлетворительными, если

$$|C - X| \leq K,$$

где C — заданная концентрация (мкг в пробе), X — средняя концентрация по результатам пяти измерений (мкг в пробе).

Если $|C - X| > K$, то результаты измерения концентрации признаются неудовлетворительными.

ЛМЗА, получившие три неудовлетворительных результата измерения заданной концентрации, получают неудовлетворительную оценку (НЕУД) по контролю примеси в целом.

Результаты внешнего контроля ежегодно публикуются в «Методическом письме. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха».

В табл. 1 приведены основные результаты внешнего контроля по семи примесям со ссылками на методические письма, в которых они опубликованы. Для каждой примеси указано общее число проконтролированных лабораторий, число лабораторий, получивших неудовлетворительные результаты, и процент лабораторий, получивших неудовлетворительные результаты, от общего числа проконтролированных лабораторий. Указанные сведения приведены для периода с 2009 по 2015 гг., когда действовали методики РД 04.186-89 (старые), и для периода с 2015 по 2018 гг., когда измерения проводились уже по новым методикам.

В табл. 2 даны количественные сведения о ЛМЗА, в которых был проведен внешний контроль, как по старым методикам, так и по новым, за период 2009—2018 гг.

В табл. 3 приведены данные о неудовлетворительных результатах внешнего контроля, из которых следует, что доля ЛМЗА, получивших неудовлетворительные оценки, при переходе на новые методики по большинству примесей (диоксид серы, диоксид азота, аммиак, фенол, сероводород) снизилась. Для формальдегида такое изменение не произошло.

Для хлорида водорода наблюдается иная ситуация, однако это вполне можно объяснить незначительным числом проконтролированных ЛМЗА и тем, что методика находится в стадии освоения.

Таблица 1
Основные результаты внешнего контроля по данным, опубликованным в «Методических письмах»

| Примесь | Количество проконтролированных ЛМЗА | | | Количество проконтролированных ЛМЗА | | | Публикация результатов контроля |
|-----------------|-------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------------------------|--------------------|------------------|---------------------------------|
| | «НЕУД», ед. | | Оценка «НЕУД», % | «НЕУД», ед. | | Оценка «НЕУД», % | |
| | Всего | Оценка «НЕУД», ед. | Оценка «НЕУД», % | Всего | Оценка «НЕУД», ед. | Оценка «НЕУД», % | |
| Диоксид серы | 118 | 6 | 5 | 141 | 4 | 3 | МП, 2018 |
| | 124 | 5 | 7 | 138 | 5 | 4 | |
| | 29 | 3 | 10 | 59 | 4 | 7 | |
| Диоксид азота | 79 | 1 | 1 | 75 | 1 | 1 | МП, 2017 |
| | 73 | 5 | 7 | | | | |
| Аммиак | 104 | 0 | 0 | 100 | 4 | 4 | МП, 2016 |
| | 109 | 8 | 7 | | | | |
| Фенол | 17 | 0 | 0 | 28 | 3 | 11 | МП, 2017 |
| | 24 | 2 | 8 | | | | |
| Формальдегид | 65 | 24 | 37 | 67 | 6 | 9 | МП, 2017 |
| | 23 | 5 | 22 | | | | |
| Хлорид водорода | 28 | 9 | 32 | | | | МП, 2017 |
| | | | | | | | |
| Сероводород | | | | | | | МП, 2017 |
| | | | | | | | |

старые методики

новые методики

Таблица 2

Количество ЛМЗА, в которых проведен внешний контроль

| Контролируемая примесь | Количество проконтролированных ЛМЗА | |
|------------------------|-------------------------------------|----------------|
| | старые методики | новые методики |
| SO ₂ | 118 | 141 |
| NO ₂ | 124 | 138 |
| Аммиак | 29 | 59 |
| Фенол | 79 | 75 |
| Формальдегид | 106 | 100 |
| H ₂ S | 39 | 67 |
| HCl | 17 | 28 |

Таблица 3

Доля ЛМЗА (%), получивших неудовлетворительные оценки по результатам внешнего контроля

| Контролируемая примесь | Доля ЛМЗА (%) с неудовлетворительными оценками | |
|------------------------|--|----------------|
| | старые методики | новые методики |
| SO ₂ | 5 | 3 |
| NO ₂ | 6 | 4 |
| Аммиак | 10 | 7 |
| Фенол | 4 | 1 |
| Формальдегид | 4 | 4 |
| H ₂ S | 30 | 9 |
| HCl | 4 | 11 |

Для более детального исследования погрешности изменений по новым методикам были использованы ряды данных погрешностей, полученных по результатам внешнего контроля. Из базы данных внешнего контроля отобраны и проанализированы ряды средних погрешностей пятикратных измерений пяти заданных концентраций по всем ЛМЗА для каждой примеси. Эти результаты представлялись

в виде гистограмм распределения погрешностей измерения концентраций примесей. Было проведено сравнение гистограмм, полученных по результатам измерений по старым и новым методикам для каждой примеси, для этого были выбраны наиболее характерные гистограммы за период 2009—2014 гг. (старые методики) и 2016—2018 гг. (новые методики).

Критерий соответствия результатов измерений заданной точности (K) при переходе на новые методики изменился следующим образом: для аммиака — 15 %, формальдегида — 17 %, фенола — 18 %, хлористого водорода — 14 %, сероводорода — 23 %. Для остальных примесей критерий соответствия результатов измерений заданной точности остался прежним — 20 %.

Анализ гистограмм распределений погрешностей по результатам внешнего контроля (рис. 1—4) показал что:

- характер распределения ближе к нормальному закону распределения;

- сократилось число явных «промахов» (значительных отклонений от заданного значения);

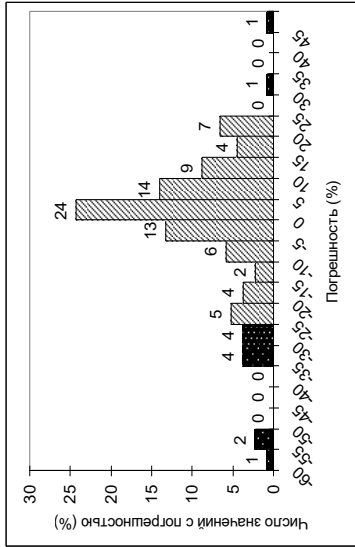
- уменьшилось смещение в сторону завышения или занижения результатов;

- увеличился процент значений в диапазоне соответствия критерию качества измерений к общему числу измерений.

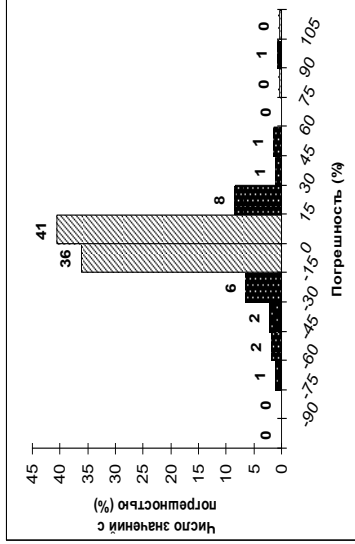
Таким образом, существенно снизилась доля систематической составляющей погрешности (правильности) и произошло уменьшение случайной составляющей. Все это свидетельствует о повышении качества контроля.

Анализ гистограмм распределений погрешностей для хлорида водорода показал улучшение результатов измерений, несмотря на то что, как было сказано выше, доля ЛМЗА, получивших неудовлетворительные оценки, от числа всех проконтролированных ЛМЗА увеличилась. Доля (%) значений в диапазоне соответствия критерию качества измерений к общему числу измерений изменилась с 92 до 96 %, характер распределения стал ближе к нормальному, уменьшилось смещение в сторону занижения результатов, число явных «промахов» сократилось.

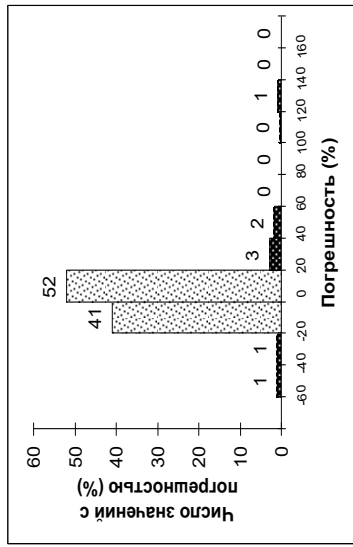
а)



б)



в)



г)

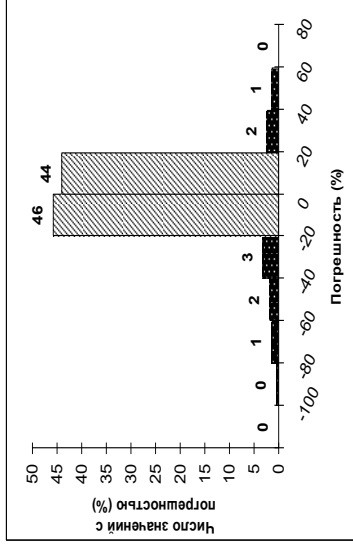
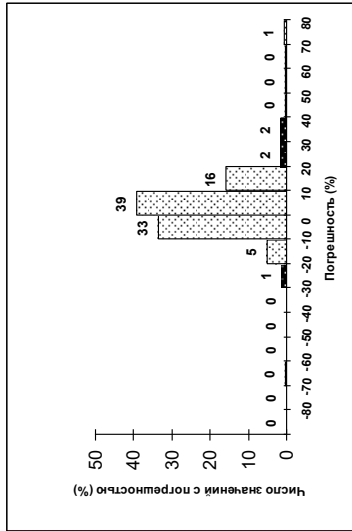
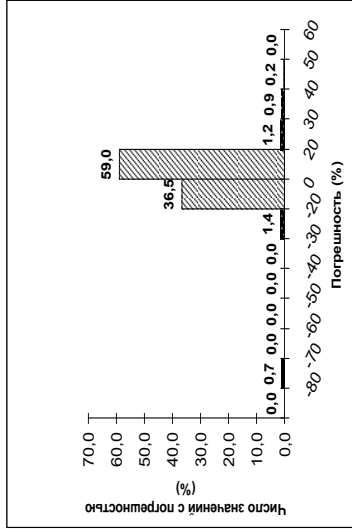


Рис. 1. Гистограммы распределений погрешностей по результатам внешнего контроля для аммиака (а, б) и диоксида серы (в, г) и новым (б, г) методикам.

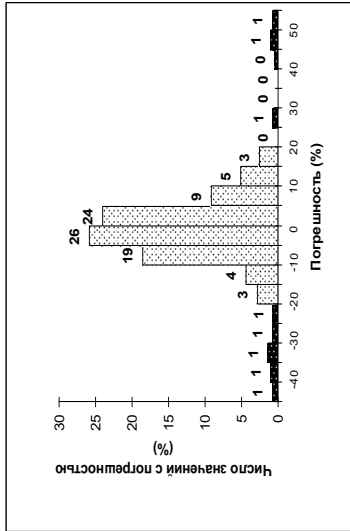
а)



б)



а)



б)

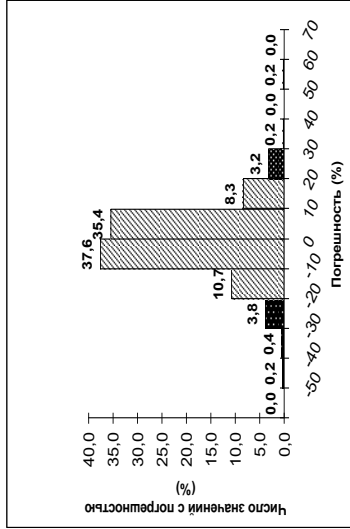
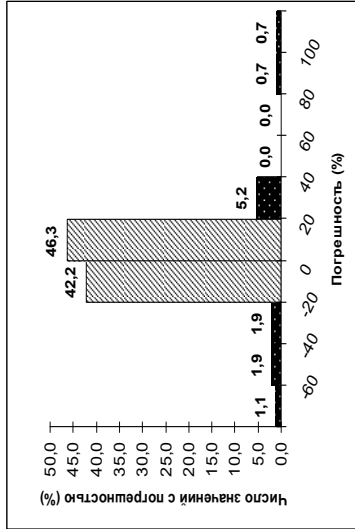
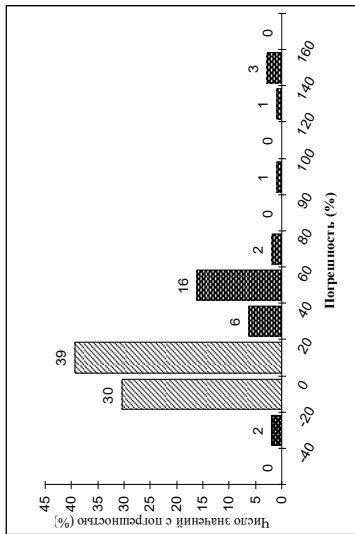


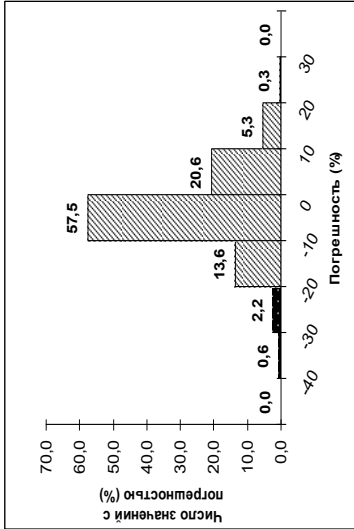
Рис. 2. Гистограммы распределений погрешностей по результатам внешнего контроля для диоксида азота (а, б) и формальдегида (в, г) по старым (а, в) и новым (б, г) методикам.



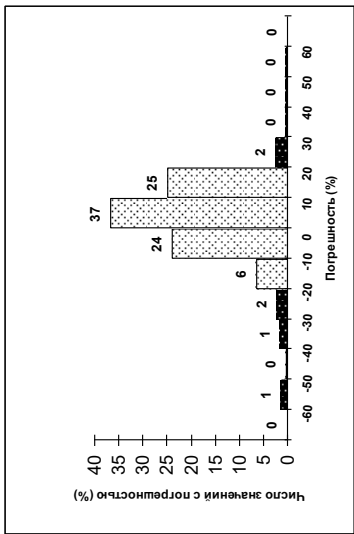
а)



б)



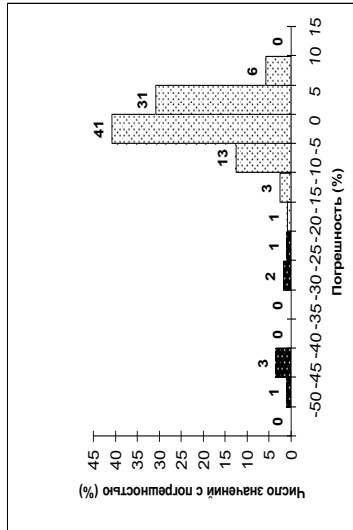
в)



г)

Рис. 3. Гистограммы распределений погрешностей по результатам внешнего контроля для сероводорода (а, б) и фенола (в, г) по старым (а, в) и новым (б, г) методикам.

а)



б)

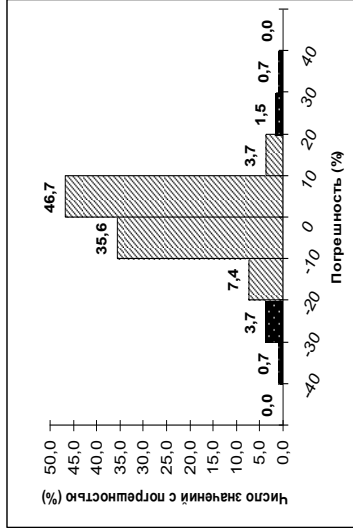


Рис. 4. Гистограммы распределений погрешностей по результатам внешнего контроля для хлорида водорода по старой (а) и новой (б) методикам.

Для объективности анализа необходимо отметить, что число проконтролированных ЛМЗА в последние годы существенно возросло: с 17 для старых методик до 28 для новых.

В целом, представленные результаты свидетельствуют о повышении качества анализа проб в сетевых ЛМЗА Росгидромета после внедрения новых методик измерений фотометрическими методами.

Заключение

Методические рекомендации по внутрилабораторному контролю качества измерений при мониторинге загрязнения атмосферы, приведенные в Методическом письме ФГБУ «ГГО» за 2012 г. (Методическое письмо, 2013), содержат подробные инструкции и разъяснения по вопросам метрологического обеспечения контроля качества измерений при анализе атмосферного воздуха в сетевых подразделениях Росгидромета. Внедрение указанных рекомендаций, а также реализация включенных в пересмотренные методики процедур внутрилабораторного контроля качества позволили добиться повышения качества анализа атмосферного воздуха в лабораториях сети МЗА Росгидромета, что подтверждается и результатами внешнего контроля точности измерений, проводимого ФГБУ «ГГО».

Сравнение результатов внешнего контроля точности измерений позволяет сделать вывод о значимом уменьшении доли неудовлетворительных результатов после введения в действие утвержденных в статусе руководящих документов Росгидромета пересмотренных методик измерения концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе РД 52.04.791-2014, РД 52.04.792-2014, РД 52.04.793-2014, РД 52.04.794-2014, РД 52.04.822-2015, РД 52.04.795-2014, РД 52.04.799-2014, РД 52.04.823-2015, РД 52.04.824-2015 и выхода разработанных ФГБУ «ГГО» Методических рекомендаций по внутрилабораторному контролю качества измерений при мониторинге загрязнения атмосферы (Методическое письмо, 2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

РД 04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы (1989). — Л.: Гидрометеиздат. 489 с.

РД 52.04.791-2014. Массовая концентрация аммиака в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с салицилатом натрия. — СПб: Моби Дик. 48 с.

РД 52.04.792-2014. Массовая концентрация оксида и диоксида азота в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с использованием сульфаниловой кислоты и 1-нафтиламина. — СПб: Моби Дик. 48 с.

РД 52.04.793-2014. Массовая концентрация хлорида водорода в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом. — СПб: Моби Дик. 44 с.

РД 52.04.794-2014. Массовая концентрация диоксида серы в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим формальдегидопарарозанилиновым методом. — СПб: Моби Дик. 52 с.

РД 52.04.822-2015. Массовая концентрация диоксида серы в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений с использованием тетрахлорртутата (ТХМ) и парарозанилина. — СПб: Моби Дик. 56 с.

РД 52.04.795-2014. Массовая концентрация сероводорода в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом по реакции образования метиленовой синей. — СПб: Моби Дик. 36 с.

РД 52.04.799-2014. Массовая концентрация фенола в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с использованием 4-аминоантипирина. — СПб: Моби Дик. 40 с.

РД 52.04.823-2015. Массовая концентрация формальдегида в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с ацетилацетоном. — СПб: Моби Дик. 48 с.

РД 52.04.824-2015. Массовая концентрация формальдегида в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с фенилгидразином. — СПб: Моби Дик. 48 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2008 г. (2009). — СПб: Д'Арт. 108 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2009 г. (2010). — СПб: Д'Арт. 80 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2010 г. (2011). — СПб: Д'Арт. 75 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2011 г. (2012). — СПб: Моби Дик. 133 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2012 г. (2013). — СПб: Моби Дик. 120 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2013 г. (2014). — СПб: Д'Арт. 136 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2015 г. (2016). — СПб: ООО «Гарант». 156 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2016 г. (2017). — СПб: ООО «Амирит». 116 с.

Методическое письмо. Обзор состояния работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха в 2017 г. (2018). — СПб: ООО «Амирит». 64 с.

**ПРОГНОЗ ПОЖАРООПАСНОСТИ
ДЛЯ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ
НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА
ПОЛЕЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Е. М. Ладохина¹, О. Г. Анискина²

¹ Северо-Западное управление по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды
199106 Санкт-Петербург, 23-я линия В.О., 2а
E-mail: katur.job@mail.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79
E-mail: olga.aniskina@mail.ru

Поступила в редакцию 19.11.2018
Поступила после доработки 11.04.2019

Введение

Пожары — это опасные явления, наносящие огромный и трудно-восполнимый ущерб природе и человеку. Пожары возникают регулярно, и в наших силах взять это явление под контроль, принимая своевременные меры по предотвращению пожароопасных ситуаций. Основная причина возгораний — человеческая деятельность, но погодные условия также очень сильно влияют на возникновение пожаров, в первую очередь в лесах.

Целью данного исследования является создание системы прогноза пожароопасных ситуаций, позволяющей снизить вред, приносимый лесными пожарами.

На сегодняшний день основной особенностью прогноза пожарной опасности (ПО) по условиям погоды является обилие методик прогноза, связанное с многообразием факторов, влияющих на

возникновение лесных пожаров. Гидродинамическое моделирование позволяет учитывать роль различных конкурирующих процессов и их влияние на распределение метеорологических величин, позволяя точнее оценить пожароопасную обстановку. Ввиду этого, прогноз пожароопасности с помощью методов гидродинамического моделирования является актуальной научной и практической задачей. Результаты прогноза пожароопасности могут быть использованы для искусственного вызывания осадков при тушении пожаров (Козлов и др., 2017).

Комплексные показатели пожарной опасности по условиям погоды

По данным Е. А. Щетинского (1996), основными причинами возникновения пожаров являются деятельность человека (более 50 %) и молнии (до 17,5 %). При этом гидрометеорологические факторы способны заметно повлиять на распространение пожаров. Например, пожар, возникший по естественной (из-за разряда молнии) или антропогенной причине (из-за неосторожного обращения с огнем), распространяется тем быстрее, чем меньше относительная влажность воздуха и больше скорость ветра (Шерстюков, 2012). Поэтому для повышения эффективности мер борьбы с лесными пожарами важно учитывать фактические погодные условия.

Для учета погодных факторов при прогнозе пожароопасности были разработаны так называемые индексы (показатели) пожароопасности по условиям погоды. В данном исследовании анализируются индексы ПО, широко применяемые в оперативной практике подразделений Гидрометслужбы РФ для прогноза ПО.

Комплексный показатель пожарной опасности В. Г. Нестерова. До В. Г. Нестерова показатели горимости оценивались по одной метеорологической величине. Им впервые было установлено, что «увеличение горимости пропорционально приращению бездождного периода, умноженного на метеорологический комплекс» (Нестеров, 1949). При исследовании связи комплексных показателей пожарной опасности (КППО)

и горимости наилучшую характеристику горимости дал трехфакторный показатель (произведение температуры воздуха и дефицита точки росы за бездождный период). С учетом значения показателя В. Г. Нестеровым была предложена шкала (или классы) пожарной опасности по условиям погоды, включающая пять классов пожароопасности: от отсутствия пожаров (индекс горимости до $300\text{ }(^{\circ}\text{C})^2\cdot\text{сут.}$) до чрезвычайной опасности (индекс горимости выше $10000\text{ }(^{\circ}\text{C})^2\cdot\text{сут.}$) (Нестеров и др., 1968). В качестве порога, после которого происходит обнуление индекса пожароопасности, принято считать выпадение осадков интенсивностью не менее 3 мм в сутки.

Комплексный показатель пожарной опасности Л. О. Сверловой. Л. О. Сверловой было выявлено влияние скорости ветра на горимость и введена поправка — коэффициент Сверловой, а также для более высоких классов ПО увеличено пороговое значение выпавших осадков, необходимое для обнуления индекса (Сверлова, 2000). Индекс пожарной опасности Сверловой учитывает влияние четырех метеорологических величин на степень ПО: температуры воздуха, дефицита точки росы, скорости ветра и осадков.

Комплексный показатель пожарной опасности по условиям погоды М. А. Сафронова. Влажность воздуха учтена в индексе Нестерова при условии испарения со свободной поверхности воды до полного высыхания. Однако с гигроскопичных лесных горючих материалов (мхов, лишайников, опада) вода испаряется не полностью, а до уровня равновесной влажности: при влажности воздуха 85 % гигроскопичные лесные материалы теряют способность к горению, хотя показатель горимости Нестерова при этом растет (Сафронов и др., 2004). Это учитывается в КППО Сафронова введением поправки на их гигроскопичность. Существует модификация индекса Сафронова, учитывающая, что после продолжительного сухого периода трех миллиметров осадков может оказаться недостаточно для полного снятия угрозы возникновения пожаров.

Комплексный показатель пожарной опасности М. Я. Здеревой. В отличие от остальных индексов, рассматриваемых в данной работе, индекс пожарной опасности Здеревой точнее учитывает зависимость упругости насыщения от температуры. В. Г. Нестеровым была

выведена относительно простая квадратичная зависимость между температурой воздуха и дефицитом точки росы. Однако эта зависимость (логарифмическая) достаточно точно описывается, например, формулой Магнуса, которая и используется в модифицированном индексе Здеревой (Здерева, Виноградова, 2009). КППО Здеревой, основанный на физико-статистических законах при подборе соответствующих ему классов пожарной опасности, представляется более предпочтительным, чем выведенный эмпирически индекс Нестерова.

Комплексный показатель пожарной опасности Г. П. Телицына.

Для оценки пожарной опасности с учетом условий погоды на основании исследований скорости высыхания лесных горючих материалов Г. П. Телицыным был предложен логарифмический показатель пожарной опасности. Этот индекс потребовал создания специальной шкалы пожароопасности, состоящей из четырех классов: от полной негоримости до высокой горимости (Телицын, 1970). Недостатком данного индекса является его резкое уменьшение в ситуации, когда разность температуры воздуха и температуры точки росы меньше единицы, что сказывается при визуализации индекса ПО для некоторой территории. Кроме того, при сравнении этого показателя с индексом Нестерова из-за несоответствия шкал требуется проведение дополнительной нормализации, что не всегда удобно.

Зарубежные показатели пожарной опасности. За рубежом для оценки горимости леса используется ряд индексов. Например, индекс KBDI (Keetch—Byram Drought Index), при вычислении которого для конкретных суток необходимо знать годовую сумму осадков в данной местности, максимальную температуру воздуха и сумму осадков за предыдущие сутки. Индекс KBDI рассчитывается по таблицам, учитывающим особенности метеорологических условий. Одна из причин низкой популярности этого индекса в России — англо-американские единицы измерения при его вычислении (Шерстюков, 2012).

В Австралии применяется индекс лесной пожарной опасности МакАртура, формализующий влияние относительной влажности, максимальной температуры воздуха, среднее за сутки значение

скорости ветра, а также показателя влажности лесных горючих материалов.

Основой расчетов рейтинговой системы лесной пожарной опасности Канады служит расчет влагосодержания лесных материалов, зависящий от метеорологических условий. Итоговым показателем пожарной опасности в Канаде является функция от влажности различных типов лесных горючих материалов и выделения энергии (Губенко, Рубинштейн, 2012).

Эти индексы в отечественной оперативной практике не используются и в данной работе не рассматриваются.

Расчет индексов пожарной опасности по результатам гидродинамического моделирования

Для моделирования прогностических полей использовалась мезомасштабная гидродинамическая модель атмосферы WRF-ARW (Вельтищев, Жупанов, 2010). В качестве объекта исследований был выбран пожароопасный сезон 2010 года на Европейской территории России, в течение которого наблюдались ситуации как с низкой, так и с чрезвычайно высокой пожароопасностью. Прогноз метеорологических полей проводился для каждого дня пожароопасного сезона с 1 мая по 30 сентября 2010 г. и рассчитывался на сутки с интервалом в 6 часов, начиная от 12 часов текущего дня; горизонтальный шаг сетки составлял 15 км. В качестве начальных и граничных условий использовались данные реанализа Национального центра экологического прогнозирования (NCEP) с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Всего были составлены и проанализированы 153 прогноза. Для прогноза индексов ПО, их визуализации и анализа был создан программный комплекс, который можно использовать в оперативной практике.

Алгоритм работы программного комплекса следующий:

1) выбор начальных и граничных условий, допускающий возможность использования результатов прогноза глобальной гидродинамической модели GFS (сайт <https://ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/gfs/prod/>) при работе программного комплекса

в оперативном режиме или результаты реанализа NCEP при работе комплекса в диагностическом режиме (сайт <https://rda.ucar.edu/data/ds083.2/grib2/>);

2) моделирование и прогноз полей метеорологических величин с использованием мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW;

3) расчет показателя ПО во всех точках прогностической сетки (в первый день пожароопасного сезона итоговый массив индексов пожароопасности равен массиву за текущий день, а в последующие дни — сумме индексов ПО за текущий день и за предыдущий);

4) визуализация результатов: поля нормализованных индексов пожарной опасности визуализируются на азимутальной равноудаленной проекции, цветовая шкала классов пожарной опасности создана непосредственно для данного исследования.

Поскольку в России степень пожарной опасности характеризуется классами ПО, все индексы были нормализованы в соответствии со шкалой пожарной опасности Нестерова (табл. 1).

Таблица 1

Результаты нормализации индексов пожарной опасности

| Класс ПО | Диапазон значений индексов | | | Пожарная опасность |
|-------------|---------------------------------------|----------|----------|-----------------------|
| | Нестерова, Сверловой, Сафронова | Телицына | Здеревой | |
| I | 0—300 | < 2 | 0—17 | Отсутствует |
| II | 301—1000 | 2—3,5 | 18—80 | Малая |
| III | 1001—4000 | 3,5—5 | 81—275 | Средняя |
| IV | 4000—10000 | > 5 | 276—450 | Высокая |
| V | > 10000 | — | > 450 | Чрезвычайная |

В данном исследовании представлены результаты моделирования с заблаговременностью 24 ч, временным разрешением 6 ч, но возможно увеличение разрешения модели и заблаговременности прогноза до 5 суток.

При верификации сопоставлялись данные о фактических возгораниях с прогностическими полями ПО. Данные об очагах пожаров получены с сайта <http://fires.ru/>, который дает доступ к мощному онлайн ГИС инструменту GeoMixer. На приведенные далее прогностические карты КППО места фактических пожаров нанесены в виде фиолетовых ромбов.

Оценка качества прогноза пожарной опасности по результатам гидродинамического моделирования

Несмотря на субъективность метода визуальной верификации, он является одним из самых эффективных, поскольку мозг человека обладает способностью быстрого выявления различий и сходств между некими объектами (Ebert, 2007). Поэтому сначала была проведена визуальная оценка качества прогноза пожарной опасности по условиям погоды на основе прогностических данных модели WRF.

В условиях высокой пожарной опасности все индексы достаточно хорошо предсказывают области возможных возгораний: как общую тенденцию концентрации пожаров, так и отдельные очаги, расположенные достаточно далеко от основной зоны высокой пожароопасности. При этом обнаруживаются некоторые различия, которые позволяют выбрать лучший индекс для прогноза ПО.

В качестве примера можно рассмотреть ситуацию 11 августа 2010 года, когда очаги возгораний наблюдались не только в климатически предрасположенных к их появлению районах юго-восточной части ЕТР, но и на северо-западе Российской Федерации (рис. 1, 2).

Индекс Нестерова успешно предсказал большинство пожаров на юге области, однако занижил пожароопасность на северо-западе. Индекс Сафронова с поправкой на гигроскопичность лесных материалов в условиях высокой степени пожарной опасности хорошо

отображает пожароопасность на юге ЕТР и на северо-западе прогностической области. КППО Телицына позволяет получить наиболее обобщенную картину пожароопасности.

Высокая пожароопасность, рассчитанная по индексу Телицына, отображается корректно, но количество ошибок второго рода («ошибки-страховки») будет гораздо выше по сравнению с другими индексами.

КППО Сверловой завышает пожарную опасность на юге ЕТР, зато лучше остальных отображает пожарную опасность на северо-западе прогностической области, прогнозируя высокую ПО в районе возгораний и малую и среднюю там, где возгораний не происходило. Это значит, что количество ошибок первого рода («ошибки-пропуски») будет меньше по сравнению с остальными индексами.

Показатель Здеревой, несмотря на существенное отличие формулы расчета от всех остальных индексов, также хорошо отображает высокую пожароопасность на юге прогностической области, однако проведенная нормализация шкалы пожарной опасности в соответствии с индексом Нестерова привела к занижению ПО на северо-западе ЕТР.

Таким образом, по результатам визуальной верификации лучшим показателем для прогноза пожарной опасности по условиям погоды являются КППО Сверловой и Сафронова.

Далее была проведена верификация прогноза ПО на основе гидродинамического моделирования с помощью критериев успешности. Для оценки по данному методу составляется матрица сопряженности фактических и прогностических результатов размером 2×2 . В ячейку n_{11} заносится число случаев, когда явление прогнозировалось и наблюдалось, в ячейку n_{12} — когда явление прогнозировалось, но не наблюдалось. Это и есть так называемые ошибки второго рода или «ошибки-страховки».

В ячейку n_{21} записывается число случаев, когда явление не прогнозировалось, но наблюдалось. Это ошибки первого рода или «ошибки-пропуски». В большинстве случаев последствия при допуске ошибки первого рода намного серьезней, чем при допуске ошибки второго рода.

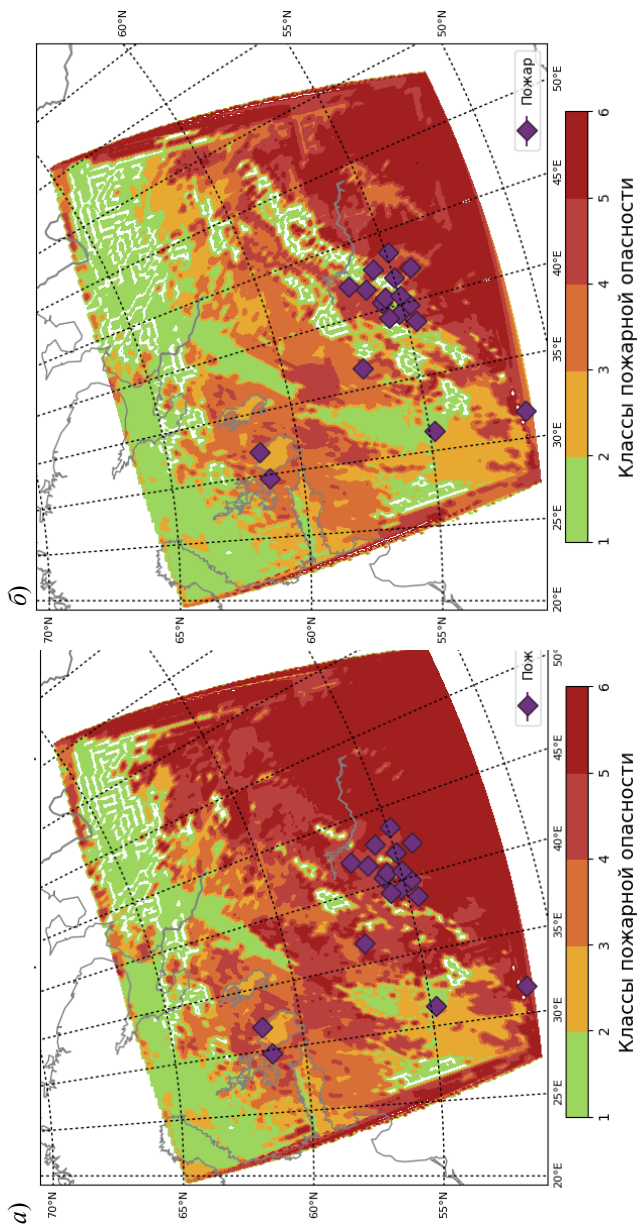


Рис. 1. Поля индексов пожароопасности и фактические точки возгораний (фиолетовые маркеры) 11.08.2010 г.: а) КШПО Свердловой; б) КШПО Нестерова.

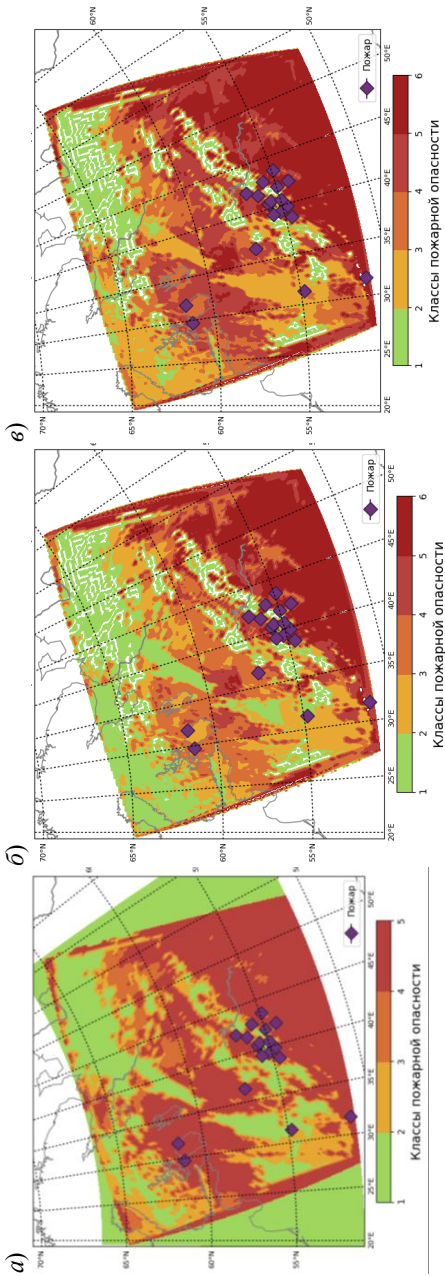


Рис. 2. Поля индексов пожароопасности и фактические точки возгораний (фиолетовые маркеры) 11.08.2010 г.: а) КПО Телицына; б) КПО Здеревой; в) КПО Сафронова.

В ячейке n_{22} помещается количество случаев, когда явление не прогнозировалось и не наблюдалось. Во вспомогательные ячейки заносятся следующие значения: n_{10} — количество спрогнозированных случаев наличия явления; n_{20} — количество спрогнозированных случаев отсутствия явления. Ячейка n_{01} представляет количество фактически произошедших явлений, а ячейка n_{02} — количество фактического отсутствия явления. N — сумма значений во всех ячейках (Дробжева, Волобуева, 2016).

При расчетах очаги пожаров были представлены как горизонтальные области размером $0,6^\circ \times 0,6^\circ$, в которых пожароопасность была выше или равна 4-му классу. С помощью матрицы сопряженности были рассчитаны следующие показатели успешности (Дробжева, Волобуева, 2016):

- 1) общая оправдываемость прогноза:

$$P_{\text{общ}} = \frac{n_{11} + n_{22}}{N}, \quad (1)$$

- 2) критический индекс успешности:

$$TS = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{21} + n_{12}}, \quad (2)$$

- 3) оценка смещения — отношение спрогнозированного количества случаев высокой пожароопасности к фактически произошедшим возгораниям:

$$BIAS = \frac{n_{11} + n_{12}}{n_{11} + n_{21}}, \quad (3)$$

- 4) вероятность обнаружения — доля наблюдаемых событий, которые были спрогнозированы:

$$POD = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{21}}, \quad (4)$$

5) вероятность ошибок второго рода — доля спрогнозированных, но не наблюдавшихся событий:

$$FAR = \frac{n_{12}}{n_{11} + n_{12}}. \quad (5)$$

Для идеального прогноза общая оправдываемость прогноза, критический индекс успешности, оценка смещения и вероятность обнаружения равны 1, а вероятность ошибок второго рода равна 0.

Результаты сравнения критериев успешности, рассчитанных для начала (май) и окончания (август) пожароопасного периода представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Критерии успешности прогноза пожароопасности за май 2010 г.

| Критерий КППО | BIAS | POD | FAR | TS | Р _{общ} |
|---------------|------|-------|-------|--------|------------------|
| Нестерова | 875 | 0,854 | 0,997 | 0,0033 | 0,855 |
| Сверловой | 2443 | 0,989 | 0,999 | 0,0009 | 0,371 |
| Сафронова | 910 | 0,372 | 0,967 | 0,0011 | 0,972 |
| Телицына | 3150 | 0,826 | 0,999 | 0,0011 | 0,575 |
| Здеревой | 824 | 0,849 | 0,997 | 0,0035 | 0,875 |

Значения критериев успешности за май и за август схожи, что говорит о том, что прогноз осадков моделью WRF выполнен корректно. Среди всех критериев успешности наиболее важным является значение показателя обнаружения, которое в мае для индекса Сафронова было намного ниже, чем в августе. Таким образом, слишком сильное занижение пожарной опасности за счет поправок на гигроскопичность

в связи с чем он не будет рассматриваться при дальнейшем сравнении успешности прогноза пожароопасности.

Таблица 3

Критерии успешности прогноза пожароопасности за август 2010 г.

| Критерий КПО | BIAS | POD | FAR | TS | $P_{\text{общ}}$ |
|--------------|------|-------|-------|--------|------------------|
| Нестерова | 539 | 0,797 | 0,996 | 0,0037 | 0,856 |
| Сверловой | 1540 | 0,959 | 0,998 | 0,0017 | 0,375 |
| Сафронова | 773 | 0,813 | 0,996 | 0,0037 | 0,858 |
| Телицына | 1831 | 0,874 | 0,998 | 0,0018 | 0,575 |
| Здеревой | 822 | 0,775 | 0,932 | 0,0035 | 0,875 |

Вероятность возникновения пожаров не эквивалентна самим случаям возгорания, поэтому оценка смещения (BIAS) у всех КПО намного больше единицы. Из анализа оценки смещения следует, что значительно больше всего завышают пожароопасность индексы Телицына (за счет более грубой по сравнению с остальными индексами шкалы) и Сверловой (за счет поправки на скорость ветра и динамического учета порогового значения выпавших осадков). Вероятность обнаружения (POD) выше 0,8 у всех критериев, кроме индексов Нестерова и Здеревой (чья шкала была проградирована в соответствии со шкалой пожароопасности Нестерова), из чего следует, что эти индексы занижают пожароопасность.

В результате анализа оценки смещения было установлено, что индексы Телицына и Сверловой завышают пожароопасность, а значит, вероятность обнаружения пожара у этих показателей будет выше, чем у остальных. Этот вывод подтверждается данными таблицы критериев успешности, однако индекс Сверловой на 8,5 % лучше обнаруживает пожары, чем индекс Телицына, поэтому завышение им пожарной опасности более оправдано. Выводы о том, что количество ошибок второго рода, а следовательно и случаев завышения пожароопасности, наибольшее у индексов Телицына и Сверловой

и наименьшее у показателей Нестерова и Здеревой, подтверждены результатами расчета критерия FAR. Однако значения вероятности ошибок второго рода у индекса Здеревой на 6 % ниже, чем у КППО Нестерова и остальных, а значит, у индекса Здеревой меньше «ошибок-страховок», что позволяет сэкономить ресурсы на мерах защиты от пожаров.

После анализа трех критериев успешности результаты расчета критического индекса успешности выглядят закономерно: наиболее высокие значения у КППО Нестерова и Здеревой, а самые низкие — у КППО Телицына и Сверловой. Такие же выводы можно сделать и после анализа результатов расчета общей оправдываемости прогноза пожарной опасности разными индексами. На данном этапе оптимальным для прогноза пожарной опасности стал индекс Нестерова, однако последствия пожаров часто бывают катастрофическими, в связи с чем затраты на дополнительные меры защиты от этого опасного явления могут быть оправданы. Исходя из этого, лучшим индексом для прогноза пожарной опасности является КППО Сверловой.

Выводы

Вопрос разработки прогноза пожароопасности в связи с серьезными разрушительными последствиями этого явления остается открытым. Погодные условия в значительной степени влияют на образование и распространение пожаров, поэтому прогноз пожароопасности по условиям погоды на основании результатов гидродинамического моделирования является актуальной задачей.

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы:

— в условиях высокой пожарной опасности ее прогноз с помощью КППО на основании результатов прогноза метеорологических характеристик моделью WRF дает хорошие результаты, согласующиеся с фактически наблюдаемыми очагами возгораний;

— при условии оправданности затрат на дополнительные меры защиты от пожаров лучше всех высокую пожароопасность прогнозирует индекс Сверловой с поправкой на скорость ветра, а наибольшую универсальность показал КППО Нестерова. Программный комплекс позволяет организовать параллельный расчет нескольких индексов с высокой оправдываемостью прогноза ПО, визуализированные результаты которых в виде ансамбля карт могут быть предоставлены синоптику для принятия окончательного решения о присвоении классов пожарной опасности территории прогноза;

— на основании того, что индекс Здеревой является наиболее физически обоснованным среди всех рассмотренных КППО, с его помощью можно успешнее прогнозировать пожароопасность при более тщательном подборе градаций классов пожарной опасности.

В дальнейшем будет проведена оценка качества прогноза с помощью диагностических методов верификации, а также, основываясь на результатах объектной верификации, будет подобрана и испытана новая шкала классов пожарной опасности для индекса Здеревой. Так как антропогенный фактор на данный момент является основной причиной пожаров, будет предпринята попытка расчета комплексных показателей пожарной опасности с учетом антропогенной нагрузки путем введения весовых коэффициентов, зависящих от дня недели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вельтищев Н. Ф., Жуванов В. Д. (2010). Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // В сб.: 80 лет Гидрометцентру России. — М.: Триада ЛТД. С. 94—135.

Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. (2012). Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности // Труды Гидрометцентра России. № 347. С. 207—222.

Дробжева Я. В., Волобуева О. В. (2016). Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность. — СПб: Адмирал. 115 с.

Здерева М. Я., Виноградова М. В. (2009). Среднесрочный прогноз степени пожарной опасности в лесах по метеорологическим условиям // Метеорология и гидрология. № 1. С. 16—26.

Козлов В. Н., Доронин А. П., Петроченко В. М. (2017). Экологическая опасность лесных пожаров и методы ее предотвращения // Ученые записки РГГМУ. № 48. С. 234—248.

Нестеров В. Г. (1949). Горимость лесов и методы ее определения. — Л.: Гослесбуиздат. 74 с.

Нестеров В. Г., Гриценко М. В., Шабунина Т. А. (1968). Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // Метеорология и гидрология. № 9. С. 102—104.

Сафронов М. А., Сафронова Т. М., Волокитина А. В. (2004). Оценка пожарной опасности по условиям погоды с использованием метеопрогнозов // Лесное хозяйство. № 6. С. 31—32.

Сверлова Л. И. (2000). Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. — Хабаровск: ДальНИИ. 46 с.

Телицын Г. П. (1970). Логарифмический показатель пожарной опасности для леса // Лесное хозяйство. № 11. С. 58—59.

Шерстюков Б. Г. (2012). Лесные пожары как метеообусловленное явление // Труды ВНИИГМИ-МЦД, № 176. С. 326—357.

Щетинский Е. А. (1996). Тушение лесных пожаров. — М.: ВНИИЦлесресурс. 80 с.

Ebert E. E. (2007). Methods for verifying satellite precipitation estimates // Measuring precipitation from space. — Springer: Dordrecht. P. 345—356.

**УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ШТОРМОВОГО ВЕТРА В РАЙОНЕ ГОРОДОВ ОРСКА
И ПЕТРОПАВЛОВСКА НА ТЕРРИТОРИИ
ЮЖНО-УРАЛЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

*Е. А. Выходцева*¹, *Н. А. Новикова*²,
*И. А. Иванова*², *Я. В. Дробжева*²

¹Центральная дирекция инфраструктуры — филиал ОАО «РЖД»
Южно-Уральская дирекция инфраструктуры —
филиал Центральной дирекции инфраструктуры
454078 Челябинск, ул. Стекольная, 47а
E-mail: ekaterinanapolskikh@gmail.com

²Российский государственный гидрометеорологический университет
195196 Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, 98
E-mail: nina.novikova@hotmail.com,
ira.nova@mail.ru,
ydropzheva@mail.ru

Поступила в редакцию 19.11.2018
Поступила после доработки 01.04.2019

Введение

Южно-Уральская железная дорога, эксплуатационная протяженность которой составляет 4800 км, осуществляет транспортное обслуживание развитого промышленного региона, обеспечивает пропуск вагонопотоков в районы Сибири и Дальнего Востока. Железнодорожный транспорт функционирует круглосуточно, поэтому его бесперебойная, четкая и безопасная работа во многом зависит от условий погоды (Зябриков и др., 2000). Решение многих текущих и перспективных задач железнодорожной отрасли требует использования специализированной гидрометеорологической информации. Оценка влияния метеорологических факторов на работу железнодорожного транспорта позволяет наладить его

работу в сложных погодных условиях. Точный прогноз скорости и направления ветра играет важную роль в обеспечении безопасности и экономической эффективности как пассажирских, так и грузовых перевозок.

Цель работы — выявление ветрозависимых участков на полигоне Южно-Уральской железной дороги и выбор эффективного метода прогноза штормового ветра, для достижения которой были решены задачи:

- анализ метеорологических данных для определения ветрозависимых участков на исследуемом полигоне;
- анализ синоптических условий, приводящих к усилению скорости ветра до штормовой на исследуемом полигоне;
- оценка успешности используемого метода прогноза штормового ветра.

Влияние сильного ветра на работу железнодорожного транспорта

Сильный ветер (более 15 м/с), особенно в сочетании с отложениями гололеда, изморози или мокрого снега, часто приводит к массовому обрыву или смещению проводов контактной сети. При скорости ветра более 15 м/с может происходить опрокидывание порожних контейнеров, а при перегоне пустых вагонов существует опасность их сноса.

При ветре со скоростью 20 м/с и более может произойти падение столбов линий связи и деревьев на линии связи и ЛЭП.

К особо опасным для железной дороги метеорологическим явлениям относятся ветры и шквалы при скорости 25—30 м/с и более.

При усилении ветра до 20 м/с и более вводится режим повышенной готовности, при котором существуют ограничения по скорости движения подвижного состава и правила установки специального оборудования для торможения, а также пересматривается расписание пассажирских и грузовых поездов для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций и уменьшения экономических затрат.

Климатические особенности территории Южно-Уральской железной дороги, влияющие на режим ветра

Южно-Уральская железная дорога проходит по территории Челябинской, Курганской, Оренбургской, Саратовской областей, Башкортостану и Казахстану. Развернутая длина главных путей — порядка восьми тысяч квадратных километров.

Рельеф территории, по которой проходит Южно-Уральская магистраль, разнообразен и сложен. Своеобразие ландшафта создают горные системы с глубоко врезающимися речными долинами, лесные массивы, лесостепи и степи. Западная цепь Уральских гор достигает высоты 1200—1600 м, южные отроги 300—400 м.

Расположение Южного Урала и Зауралья в центре Евразии определяет своеобразие климата, который формируется под воздействием как Атлантического океана, так и материка.

Влияние океана проявляется в преобладании западного переноса насыщенных влагой воздушных масс, влияние материка — в годовом ходе температуры воздуха, ее резких суточных колебаниях (Воробьев, 1991). Для Южного Урала характерна частая смена воздушных масс.

Уральский хребет — естественная граница между европейской территорией и Западной Сибирью — способствует увеличению количества осадков в Предуралье. Недостаточное увлажнение и периодически повторяющиеся засухи — характерная черта климата южных районов Челябинской и Оренбургской областей. Влияние материка в Зауралье проявляется в увеличении продолжительности зимы, морозоопасности в начале и конце лета (Секерина, 1997).

Синоптические процессы, приводящие к усилению ветра на Южно-Уральской железной дороге

Усиление ветра, а в зимнее время метелевые явления на территории дороги связаны с атмосферными процессами четырех типов (Хандожко, 1988).

Первый тип (наиболее опасный) связан с выходом южных циклонов с Черного, Каспийского или Аральского морей.

Максимальная скорость смещения таких циклонов около 60 км/ч. При юго-западных процессах основной циклонический центр за сутки до начала усиления ветра располагается над северным побережьем Черного моря. Сильный ветер и метели, начинаясь на южных и западных участках, распространяются на остальную территорию дороги. Средняя продолжительность явления не менее двух суток. Преобладающее направление ветра на южных участках восточное, северо-восточное, на остальных — юго-западное. Наиболее опасная обстановка создается при регенерации южных циклонов. Обострению фронтальной зоны и увеличению барических градиентов над Южным Уралом способствует заток арктических масс воздуха в тыловой части циклонических образований. Максимальная скорость ветра достигала 28—33 м/с, суточное количество осадков 27—35 мм, контрасты температуры воздуха в зоне фронтов 15—20 градусов на 1000 км.

Второй тип усиления ветра и метелей наблюдается при «нырании» циклонов с северо-западных районов на юго-восток. При этом нередко происходит их слияние с южными циклонами. Процесс заканчивается вторжением на Южный Урал воздушных масс с западной акватории Арктики. Максимальная скорость ветра при метелях этого типа может достигать 25—28 м/с.

Третий тип связан с образованием в Предуралье частных циклонов на волнах холодных фронтов, при этом основные центры циклонов смещаются в высоких широтах. Вероятность возникновения частных циклонов по сравнению с повторяемостью 1-го и 2-го типов сравнительно небольшая.

Четвертый тип наблюдается при подходе циклонов к отрогу Сибирского антициклона, располагающегося над восточным участком дороги. Увеличение барических градиентов в передней части циклонов приводит к возникновению штормового ветра и метелевых явлений задолго до приближения основного атмосферного фронта.

Характеристика исходных материалов и их систематизация

Для выполнения исследований использовались данные из официального архива данных сектора гидрометеорологии Южно-

Уральской железной дороги. Была произведена выборка данных по направлению ветра и его скорости (выбирались случаи со скоростью ветра 20 и более м/с) за 8-летний период (2010—2017 гг.) по 18-ти метеорологическим станциям государственной наблюдательной сети, расположенным вблизи Южно-Уральской железной дороги: Нязепетровск, Златоуст, Катав-Ивановск, Верхний Уфалей, Челябинск, Троицк, Карталы, Магнитогорск, Бреды, Орск, Бузулук, Оренбург, Перелюб, Курган, Шадринск, Шумиха, Макушино, Петропавловск.

В результате проведенного анализа было установлено, что усиление приземного ветра до опасных градаций в период с 2010 по 2017 гг. наиболее часто наблюдалось в районах городов Орска и Петропавловска (Казахстан):

— на Орской дистанции пути (метеостанция Орск) было выявлено 53 случая достижения скорости ветра 20 и более м/с;

— на территории Петропавловского отделения дороги (метеостанция Петропавловск) — 79 случаев достижения скорости ветра 20 м/с и более.

Эти результаты послужили основанием для более подробного анализа причин возникновения штормового ветра в районе городов Орска и Петропавловска и оценки успешности его прогнозирования.

На указанных участках дороги средняя месячная скорость ветра в зимние и летние месяцы выше, чем на остальных участках. Для них также характерна высокая повторяемость метелей.

Выбор метода прогнозирования штормовой скорости ветра для данного региона является весьма важным, так как от качества разработанных прогнозов зависит успешность адаптации потребителя к опасному явлению погоды (Абрамова и др., 2018). В связи с этим в работе рассмотрена возможность использования метода Н. А. Лебедевой для прогноза сильного ветра в районе городов Орска и Петропавловска на полигоне Южно-Уральской железной дороги.

Оценка метода прогноза сильного ветра в ветрозависимом районе Южно-Уральской железной дороги

В ходе составления ежедневного прогноза скорости ветра на основании прогнозируемой синоптической ситуации в случаях, когда возникает угроза усиления ветра до 20 м/с и более, дополнительно (для прогноза штормового ветра) применяют метод Н. А. Лебедевой.

Метод основан на использовании прогностической карты АТ₈₅₀ и позволяет разрабатывать прогноз с заблаговременностью до 24 часов (Богаткин, 2010). Прогноз дается по графику, приведенному на рис. 1 (Хандожко, 1989).

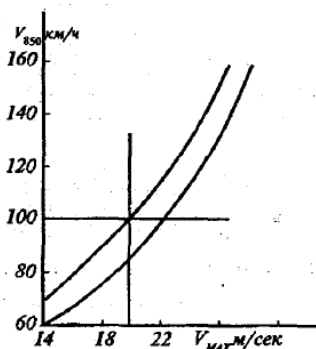


Рис. 1. График для определения диапазона максимальной скорости ветра.

Входным параметром является скорость ветра, рассчитанная по прогностической карте АТ₈₅₀ (V_{850}). В формулировке прогноза указывается градация V_{max} , границы которой определяются по кривым на поле графика.

Определение критериев успешности

Успешность прогнозов определяется путем сравнения прогнозируемых метеорологических величин и явлений с данными наблюдений на метеорологических станциях, расположенных на

территории, для которой был составлен прогноз (Наставление..., 2009).

Для оценки успешности прогнозов используются матрицы сопряженности (табл. 1) (Дробжева, Волобуева, 2016). Критерии успешности прогнозов: общая оправдываемость прогнозов P , оправдываемость прогноза факта наличия явления $U_{ня}$, оправдываемость прогноза факта отсутствия явления $U_{оя}$, критерий точности прогнозов А. М. Обухова Q , критерий надежности прогнозов Н. А. Багрова рассчитываются по формулам (1)—(5) (Хандожко, 2005).

Таблица 1

Матрица сопряженности альтернативных прогнозов

| Фактически наблюдалось, Φ_i | Явление прогнозировалось, Π | Явление не прогнозировалось, $\bar{\Pi}$ | $m=2$ $\sum_{j=1} n_j$ |
|--|---------------------------------------|--|---------------------------|
| Явление было, Φ | n_{11} | n_{12} | n_{10} |
| Явления не было, $\bar{\Phi}$ | n_{21} | n_{22} | n_{20} |
| $n=2$ $\sum_{i=1} n_i$ | n_{01} | n_{02} | N |

n_{11} — число случаев оправдавшихся прогнозов наличия явления: явление прогнозировалось и фактически наблюдалось;

n_{21} — число случаев неоправдавшихся прогнозов наличия явления: явление прогнозировалось, но фактически не наблюдалось;

n_{01} — общее число случаев, когда явление прогнозировалось;

n_{12} — число случаев неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления: явление не прогнозировалось, но фактически наблюдалось;

n_{22} — число случаев оправдавшихся прогнозов отсутствия явлений: явление не прогнозировалось и фактически не наблюдалось;

n_{02} — общее число случаев, когда явление не прогнозировалось;

n_{10} — общее число случаев, когда явление было;

n_{20} — общее число случаев, когда явления не было;

N — общее число всех случаев.

Общая оправдываемость прогнозов (%) определяется по формуле:

$$P = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} \cdot 100 \%. \quad (1)$$

Оправдываемость прогноза факта наличия явления:

$$U_{ня} = \frac{n_{11}}{n_{10}} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления:

$$U_{оя} = \frac{n_{22}}{n_{10}} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Критерий точности прогнозов по А. М. Обухова рассчитывается по формуле:

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{12} + n_{21}}{n_{10} + n_{20}} \right), \quad (4)$$

где n_{12}/n_{10} и n_{21}/n_{20} — относительные ошибки прогнозов.

Показатель Q выражает долю точных, успешных прогнозов при известной повторяемости фаз погоды. Он меняется в пределах от 1 до -1 (идеальные прогнозы и все прогнозы ошибочны).

Критерий надежности прогнозов Н. А. Багрова рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{P - p_{сл}}{1 - p_{сл}}, \quad (5)$$

где $p_{сл} = \frac{n_{11}^{сл} + n_{22}^{сл}}{N} \cdot 100\%$. — общая оправдываемость случайных прогнозов; $n_{11}^{сл} = \frac{n_{10} n_{01}}{N}$ и $n_{22}^{сл} = \frac{n_{20} n_{02}}{N}$ — число случаев оправдавшихся случайных прогнозов наличия и отсутствия явления соответственно.

Критерий H характеризует относительное приращение общей оправдываемости оцениваемых прогнозов к максимально возможному. Значения H меняются в пределах от 0 до 1.

Оценка успешности метода Н. А. Лебедевой для прогноза скорости штормового ветра

Оценка успешности прогнозов скорости штормового ветра производилась по оперативным данным метеостанций городов Орска и Петропавловска. Всего было рассмотрено по 2922 ежедневных прогноза для обеих станций за период 2010—2017 гг.

На основе матриц сопряженности альтернативных методических прогнозов штормового ветра для Орска и Петропавловска (табл. 2 и 3) были рассчитаны критерии успешности (формулы 1—5).

Таблица 2

**Матрица сопряженности методических прогнозов
штормового ветра для г. Орска**

| | Сильный ветер прогнозировался, Π | Сильный ветер не прогнозировался, $\bar{\Pi}$ | $m=2$ $\sum_{j=1} n_j$ |
|--|--|---|---------------------------|
| Сильный ветер наблюдался, Φ | 44 | 9 | 53 |
| Сильный ветер не наблюдался, $\bar{\Phi}$ | 113 | 2756 | 2869 |
| $n=2$ $\sum_{i=1} n_i$ | 157 | 2765 | 2922 |

**Матрица сопряженности методических прогнозов
штормового ветра для г. Петропавловска**

| | Сильный ветер прогнозировался, $\bar{П}$ | Сильный ветер не прогнозировался, $\bar{\bar{П}}$ | $m=2$ $\sum n_j$ $j=1$ |
|--|--|---|------------------------------|
| Сильный ветер наблюдался, $\bar{\Phi}$ | 61 | 18 | 79 |
| Сильный ветер не наблюдался, $\bar{\bar{\Phi}}$ | 126 | 2717 | 2843 |
| $n=2$ $\sum n_i$ $i=1$ | 187 | 2735 | 2922 |

Результаты расчета критериев успешности метода прогнозов штормового ветра для городов Орска и Петропавловска представлены в таблице 4.

Результаты расчетов показали, что общая оправдываемость прогноза штормового ветра в Орске и Петропавловске составила 96 и 95 % соответственно, оправдываемость факта наличия явления — 83 и 77 %, оправдываемость факта отсутствия явления — 96 %.

Критерии точности А. М. Обухова составил 0,79 и 0,72, а критерий надежности Н. А. Багрова — 0,43 и 0,44 соответственно, что свидетельствует о недостаточной надежности прогнозов, разработанных по методу Н. А. Лебедевой.

Однако в целом можно говорить о том, что рассмотренный метод прогноза штормового ветра эффективен, и его можно рекомендовать для дальнейшего использования в практической работе по гидрометеорологическому обеспечению железнодорожного транспорта.

Для улучшения качества прогнозов штормовой скорости ветра можно рекомендовать дополнительно проанализировать случаи неоправдавшихся прогнозов и учесть синоптические ситуации, ошибочно принятые за безопасные.

**Критерии успешности прогноза штормового ветра
для городов Орска и Петропавловска**

| Критерии успешности прогнозов штормового ветра | Значения критериев успешности | |
|---|-------------------------------|---------------|
| | Орск | Петропавловск |
| Общая оправдываемость прогнозов (P), % | 96 | 95 |
| Оправдываемость прогноза — факта наличия штормового ветра ($U_{ня}$), % | 83 | 87 |
| Оправдываемость прогноза — факта отсутствия штормового ветра ($U_{оя}$), % | 96 | 96 |
| Критерий точности прогнозов А. М. Обухова (Q) | 0,79 | 0,72 |
| Критерий надежности прогнозов Н. А. Багрова (H) | 0,43 | 0,44 |

Заключение

При изучении ветрового режима на территории Южно-Уральской железной дороги и выбора метода прогнозирования штормового ветра была сформирована база данных по скорости ветра за период 2010—2017 гг.; выполнен обзор факторов и синоптических ситуаций, приводящих к усилению ветра; проанализированы физико-географические и климатические особенности изучаемой территории и выделены ветрозависимые участки, на которых скорость ветра достигает штормовых значений. Впервые произведена оценка метода Н. А. Лебедевой для прогноза штормового ветра с использованием матричной системы успешности прогнозов для городов Орска и Петропавловска.

Метод Н. А. Лебедевой оказался достаточно эффективным для расчета штормового ветра, влияющего на безопасную работу железнодорожного транспорта, и может быть рекомендован для дальнейшего использования в ежедневной прогностической работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамова И. Ф., Новикова Н. А., Дробжева Я. В. (2018). Оценка успешности прогнозирования штормового ветра в Архангельске по методу А. И. Снитковского // Труды ГГО. Вып. 590. С. 160—170.

Богаткин О. Г. (2010). Авиационные прогнозы погоды. — СПб: БХВ-Петербург. 288 с.

Воробьев В. И. (1991). Синоптическая метеорология. — Л.: Гидрометеиздат. 616 с.

Дробжева Я. В., Волобуева О. В. (2016). Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность. — СПб: Адмирал. 116 с.

Зябриков В. А., Кобышева Н. В., Циркунов В. С. (2000). Климат и железнодорожный транспорт. — М.: Метеоагентство Росгидромета. 187 с.

Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724 (2009). — Обнинск: ИГ-СОЦИН. 50 с.

Секерина Г. Г. (1997). Климатическая характеристика Южно-Уральской железной дороги. — Челябинск: Челябинский ГУ. 149 с.

Хандожко Л. А. (1988). Региональные синоптические процессы. — Л.: ЛГМИ. 102 с.

Хандожко Л. А. (1989). Региональные прогнозы погоды. — Л.: ЛГМИ. 135 с.

Хандожко Л. А. (2005). Экономическая метеорология. — СПб: Гидрометеиздат. 490 с.

**ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО
ПОКРОВА НА ЮГЕ ЕТР
КАК ОТКЛИК ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ**

Б. А. Ашабоков^{1,2}, А. А. Ташилова¹, Л. А. Кешева¹

¹Высокогорный геофизический институт
Нальчик, пр. Ленина, 2

²Институт информатики и проблем регионального управления,
ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный
центр Российской академии наук»
Нальчик, ул. И. Арманд, 37 А
E-mail: tashilovaa@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2018

Поступила после доработки 11.02.2019

Введение

На фоне глобального потепления, наблюдаемого в последние десятилетия, происходят изменения всех элементов климатической системы. Наблюдаемые изменения климата и вызываемые ими последствия неоднородны в пространстве и во времени. Это, в частности, касается и основных характеристик снежного покрова: среднедекадной высоты снега, дат начала и конца устойчивого снежного покрова. В последние десятилетия площадь снежного покрова в Северном полушарии значительно сократилась по сравнению с серединой XX в. (Пятый оценочный..., 2012).

Результаты исследований в этом направлении представлены в ряде статей (Бардин, Платова, 2013; Булыгина и др., 2008; Глоссарий терминов..., 2001; Груза, Ранькова, 2012; Кренке и др., 2001).

Материалы и методы

Для оценки происходящих в последние десятилетия изменений характеристик снежного покрова на юге европейской территории России (ЕТР) по наблюдениям десяти метеорологических станций (см. табл. 1) были проанализированы ряды данных о высоте снежного покрова (СП), числе дней со СП, датах начала и конца схода СП, датах установления / разрушения устойчивого СП в холодные сезоны 1961—2012 гг. За холодный сезон был принят период с октября по апрель.

Таблица 1

Информация о метеорологических станциях, данные которых использовались в работе

| Станция | Широта, с. ш. | Долгота, в. д. | Высота над уровнем моря, м |
|---------------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| <i>Равнинные станции</i> | | | |
| Изобильный | 45,37° | 41,72° | 194 |
| Майкоп | 44,61° | 40,11° | 270 |
| Прохладная | 43,75° | 44,03° | 198 |
| <i>Предгорные станции</i> | | | |
| Владикавказ | 43,02° | 44,68° | 680 |
| Каменномостский | 43,73° | 43,05° | 866 |
| Кисловодск | 43,90° | 42,72° | 819 |
| Нальчик | 43,48° | 43,62° | 500 |
| Ставрополь | 45,03° | 41,97° | 540 |
| Черкесск | 44,22° | 42,06° | 526 |
| <i>Горная станция</i> | | | |
| Теберда | 43,45° | 41,75° | 1335 |

Для статистической обработки рядов дат «начало / конец снежного покрова», а также дат «установления / разрушения устойчивого снежного покрова» исходные ряды, состоящие из дат, были преобразованы в числовые путем кодировки. Для этого в рядах дат начала появления снежного покрова (для всех рассматриваемых

станций) были выбраны самая ранняя и самая поздняя даты, первой присваивался номер 1, далее дни нумеровались по порядку до даты наиболее позднего появления снежного покрова.

В рассматриваемом массиве данных самое раннее появление снежного покрова было зафиксировано 29 сентября, и этой дате был присвоен номер 1, а самой поздней дате (25 января) — номер 119 (см. табл. 2). Затем для каждой станции ряд дат преобразовывался в ряд чисел (см. пример в табл. 3). После преобразования рядов дат в числовые к последним могут быть применены методы статистической обработки.

Таблица 2

**Кодировка дат начала снежного покрова
по данным 11 м/станций**

| Дата | Код |
|-------|-----|
| 29.09 | 1 |
| 30.09 | 2 |
| 01.10 | 3 |
| ... | ... |
| 23.01 | 117 |
| 24.01 | 118 |
| 25.01 | 119 |

Таблица 3

**Пример преобразования ряда дат установление снежного покрова
на станции Моздок в числовой ряд**

| Годы | Ряд с реальными датами | Ряд с кодированными датами |
|------|------------------------|----------------------------|
| 1961 | 19.01 | 113 |
| 1962 | 14.11 | 47 |
| 1963 | 12.11 | 45 |
| ... | ... | ... |
| 2010 | 15.12 | 78 |
| 2011 | 18.01 | 112 |
| 2012 | 07.11 | 40 |

Аналогично производилось преобразование рядов дат схода снежного покрова и дат установления / разрушения устойчивого снежного покрова.

Для каждого из рассматриваемых рядов были определены пороговые значения, относительно которых оценивались экстремумы, т. е. значения, которые были выше (ниже) некоторого порога, близкого к верхнему (или нижнему) диапазону наблюдаемых значений переменной (Глоссарий терминов..., 2001). Для определения порогового значения строился ранжированный ряд, который разбивался на квантили (25 %, 50 %, 75 %) и находилась разница между 75 % и 25 % квантилями. Значения, превышающие более чем на полторы разницы между 75 % и 25 % квантилями (пороговое значение), являются экстремумами (Бююль и др., 2012).

Для дат начала СП по описанной методике обрабатывался кодированный (числовой) ряд, в результате чего были определены аномальные значения, которые были выше и ниже пороговых.

Характеристики продолжительности залегания снежного покрова и их критерии определялись в соответствии с методикой ГГО (Методические указания, 1966). В качестве характеристики высоты снежного покрова рассматривалась средняя декадная высота.

В результате статистической обработки рядов характеристик снежного покрова были получены климатические нормы (средние многолетние за 1961—1990 гг.) и средние многолетние значения за весь рассматриваемый период. Ряды высоты снежного покрова для каждой станции аппроксимировались линейными уравнениями типа $y = ax + b$, при этом определялись скорости изменения характеристик снежного покрова (коэффициенты «а» линейного уравнения) и коэффициент детерминации D :

$$D = \left(1 - \frac{S_{ост}^2}{S_{ряда}^2}\right) \cdot 100\%$$

где $s_{ост}^2$ – дисперсия остатков; $s_{ряда}^2$ – дисперсия исходного ряда.

Для принятия гипотезы о наличии линейного тренда был принят 95 % уровень значимости. Нижний порог величины коэффициента

детерминации, определяющий статистическую значимость тренда, при 95 % уровне значимости равен 7 % ($n = 52$). Определена статистическая разница (Т-тест) средних значений исследуемых метеопараметров и соответствующих климатических норм. Статистическая значимость изменений характеристик снежного покрова оценивалась также с применением статистик Фишера (F) и Стьюдента (Stud).

Результаты и обсуждение

Предварительные результаты статистического анализа характеристик снежного покрова в различных климатических зонах юга ЕТР ранее были представлены в работах (Ашабоков и др., 2015; Кешева, 2016; Ташилова и др., 2014; Ташилова, Кешева, 2012; Ашабоков, Крученицкий и др., 2017).

Распределение средней декадной высоты снежного покрова (за период 1961—2012 гг.) на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов приведено на рис. 1.

Результаты линейной аппроксимации рядов высоты снежного покрова и критерии оценки их статистической значимости для всех рассматриваемых станций представлены в табл. 4. Установлено, что по данным всех станций наблюдается тенденция к слабому увеличению высоты снежного покрова, но выявленные изменения статистически незначимы (исключение составляет станция Ставрополь, для которой $D=8,859$ % и статистика Стьюдента < 5 %).

Аналогичный результат о статистической незначимости временных изменений был получен и для других характеристик СП.

Основные характеристики снежного покрова для отдельных станций приведены в табл. 5.

Средняя декадная высота снежного покрова в холодные сезоны 1960/61—2011/12 гг. увеличивается по мере увеличения высоты над уровнем моря: 4,6 ($\sigma = 2,3$) на равнине, 5,5 ($\sigma = 4,0$) в предгорной зоне и 7,3 см ($\sigma = 5$ см) в горах (на высоте более 1300 м).

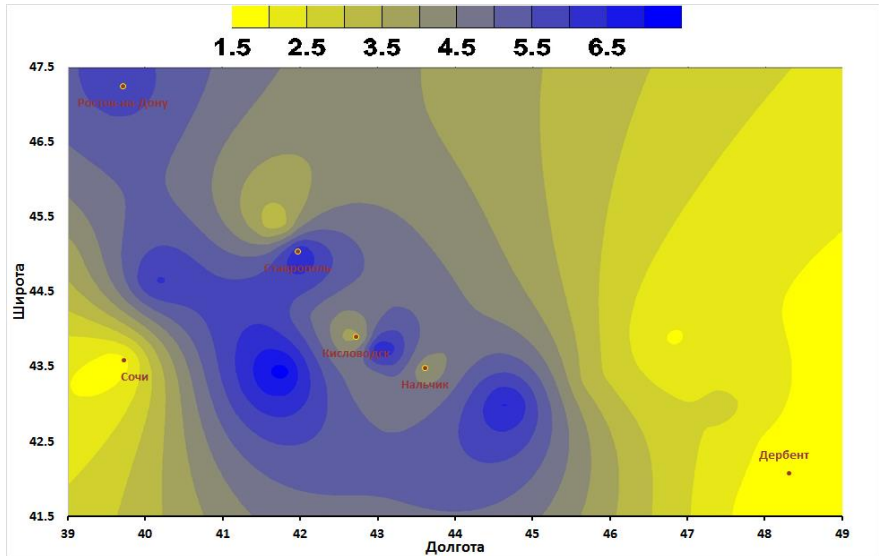


Рис. 1. Распределение средней за холодный период высоты СП (см) на юге ЕТР (период осреднения 1961—2012 гг.)

Минимальная среднедекадная высота снежного покрова 0,3 см пришлась на сезон 1980/81 гг. в Прохладной (равнина), а максимальная высота 24,5 см — на сезон 1972/72 гг. во Владикавказе (предгорная зона).

Распределение всех рядов нормальное, с небольшими положительными коэффициентами асимметрии и эксцесса, что характеризует небольшое преобладание значений, превышающих среднее.

Среднее многолетнее значение высоты снежного покрова за период 1961—2012 гг. оказалось выше среднего многолетнего значения для базового периода (1961—1990 гг.), но осталось в границах статистического равенства, поскольку уровень значимости $\text{Sig.} > 0,05$.

Таблица 4

**Результаты линейной аппроксимации рядов
высоты снежного покрова**

| Станция | a, см/год | Стандартная ошибка коэффициента a | D, % | Статистика Фишера, F | Статистика Стьюдента, Stud |
|---------------------------|----------------------|--|-------------|-------------------------------------|---|
| Равнинные станции | | | | | |
| Майкоп | 0,04419 | 0,02685 | 5,130 | 2,7081 | 0,10610 |
| Изобильный | 0,01389 | 0,01740 | 1,258 | 0,63728 | 0,42847 |
| Прохладный | 0,02014 | 0,02025 | 1,940 | 0,98935 | 0,32468 |
| Предгорные станции | | | | | |
| Владикавказ | 0,04067 | 0,04536 | 1,582 | 0,80382 | 0,37424 |
| Каменноостровский | 0,07208 | 0,04291 | 5,342 | 2,82209 | 0,09921 |
| Кисловодск | 0,03597 | 0,02404 | 4,285 | 2,23837 | 0,14090 |
| Нальчик | 0,02577 | 0,02618 | 1,901 | 0,96919 | 0,32962 |
| Ставрополь | 0,10522 | 0,0477 | 8,859 | 4,86052 | 0,03211 |
| Черкесск | 0,03775 | 0,0341 | 2,394 | 1,22641 | 0,27340 |
| Горная станция | | | | | |
| Теберда | 0,0606 | 0,04622 | 3,322 | 1,71839 | 0,19589 |
| Регион (в целом) | 0,027256 | 0,01899 | 3,955 | 2,05886 | 0,15755 |

Таблица 5

Статистические характеристики характеристик снежного покрова
за 1961—2012 гг.

| Характеристика | Высота СП, см | Число дней со СП | Дата | | | |
|------------------------|------------------|---------------------|------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| | | | начало СП | конец схода СП | установление устойчивого СП | разрушение устойчивого СП |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Среднее многолетнее | 4,1 | 49 | 22 ноября | 15 марта | 9 января | 24 февраля |
| Среднее σ | 4,6 | 49 | 24 ноября | 16 марта | 4 января | 17 февраля |
| Минимум год | 2,3 | 18 | 19 дней | 15 дней | 19 дней | 22 дня |
| Минимум год | 0,3 | 9 | 13.10.2004 | 04.02.1989 | 10.11.1994 | 18.12.1994 |
| стация | 1980/81 | 1980/1981 | Прохладная | Изобильный | Прохладная | Изобильный |
| Максимум год | 11,8 | 97 | 19.01.1961 | 22.04.2011 | 05.02.1976 | 28.03.1997 |
| стация | 2003/2004 | 1993/1994 | Прохладная | Майкоп | Прохладная | Майкоп |
| а./10лет | 0,26см | -0,6дн. | 0,4дня | 1,7 дня, | -3дня | -4,5 дня |
| D, % | 5,6 | 0,2 | 0,1 | 4 | 5 | 11,2 %* |

Равнинные станции

Продолжение таблицы 5

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------|------------|
| | | | <i>прегорные станции</i> | | | |
| Среднее многолетнее | 4,7см | 65 | 14 ноября | 29 марта | 28 декабря | 24 февраля |
| Среднее | 5,5 | 65 | 15 ноября | 25 марта | 31 декабря | 23 февраля |
| σ | 4,0 | 21 | 20 | 15 | 21 | 23 |
| Минимум | 0,7 | 12 | 01.10.1971 | 03.01.2009 | 10.11.2012 | 20.12.2011 |
| год, станция | 1965/66 Черкесск | 1965/66 Каменно- мостский | Владикавказ | Каменно- мостский. 09.05.1999 | Кисловодск | Черкесск |
| Максимум | 24,5 | 127 | 25.01.1991 | | 08.02.1969 | 18.04.2009 |
| год, станция | 1972/73 Владикавказ | 1973/74 Владикавказ | Каменно- мостский. | Кисловодск | Кисловодск | Ставрополь |
| а/10лет | 0,52 | 0,5 | 0,3 | -0,3 | -1,5 | -1,8 |
| D,% | 6,4 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 1,7 | 1,0 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|
| | | | <i>Горная станция</i> | | | |
| Среднее многолетнее | 6,5 | 83 | 6 ноября | 14 апреля | 12 декабря | 26 февраля |
| Среднее | 7,3 | 88 | 3 ноября | 13 апреля | 15 декабря | 28 февраля |
| σ | 5,0 | 27 | 20 | 16 | 26 | |
| Минимум, год | 1,4 см (1965/1966) | 34дн. (1965/1966) | 29.09.2009 | 09.03.2008 | 05.11.2007 | 26.12.1996 |
| Максимум, год | 22,1 см (2011/2012) | 145 (2011/2012) | 30.12.1997 | 22.05.1990 | 02.02.2003 | 04.04.2003 |
| а/10лет | 0,6см | 5 | -3,8 | 0,3 | -0,9 | -0,3 |
| D, % | 3,3 | 7,9 | 7,9 | 0,0 | 0,2 | 0,0 |

Примечание:

Жирным шрифтом выделены статистически значимые результаты.

Среднее число дней со снежным покровом увеличивается с увеличением высоты станции над уровнем моря: на равнине 49 ($\sigma = 18$) дней, в предгорной зоне 65 ($\sigma = 21$) дней и в горной зоне 88 ($\sigma = 27$) дней.

Среднее число дней со снежным покровом на равнине и в предгорной зоне за рассматриваемый период совпадает с климатической нормой. В горной зоне наблюдалось небольшое увеличение числа дней со СП, но Т-тест не выявил статистически значимых различий между этими величинами. Минимальное число дней (9 дней) пришлось на сезон 1980/81 гг. на равнинной станции Прохладная (малоснежная зима). Максимальное число дней со снежным покровом (145 дня) пришлось на сезон 2011/2012 гг. на горной станции Теберда.

В период 1961—2012 гг. на равнинных станциях происходило незначительное сокращение продолжительности периода со снежным покровом. Изменение числа дней со снежным покровом за период составило $-0,6$ дней/10 лет. Тренд статистически незначим ($D = 0,2\%$).

Средняя для предгорной территории скорость изменения числа дней со снежным покровом за период 1961—2012 гг. составила $+0,5$ дня/10 лет (тренд статистически незначим, $D = 0,1\%$). На двух предгорных станциях Черкесск и Кисловодск, расположенных достаточно близко, выявлено заметное увеличение числа дней со снежным покровом со скоростью 2 дня/10 лет и 3,8 дня/10 лет соответственно. В Нальчике скорость увеличения числа дней со снежным покровом составила лишь 0,35 дня/10 лет. На остальных трех предгорных станциях наблюдалось слабое уменьшение числа дней со снежным покровом.

Из всех исследованных станций особое место занимает горная станция Теберда (1335 м), где наблюдалась наибольшая и статистически значимая скорость увеличения числа дней со снежным покровом, составившая 5 дней/10 лет.

Высота снежного покрова и продолжительность его залегания связаны между собой (см. рис. 2): увеличение высоты снежного покрова как правило сопровождается незначительным увеличением

числа дней со снежным покровом и наоборот, коэффициент корреляции для рассматриваемого периода составил 0,76.

В сезоны с малой высотой снежного покрова число дней со снежным покровом, как правило, невелико (сезоны 1965 / 66 гг., 1969 / 70 гг., 1980 / 81 гг., 1996 / 97 гг., 2000 / 01 гг.). В «снежные» годы со продолжительность периода залегания снежного покрова увеличивается (сезоны 1964 / 65, 1972 / 73, 1976 / 77, 1992 / 93, 2011/12 годов).

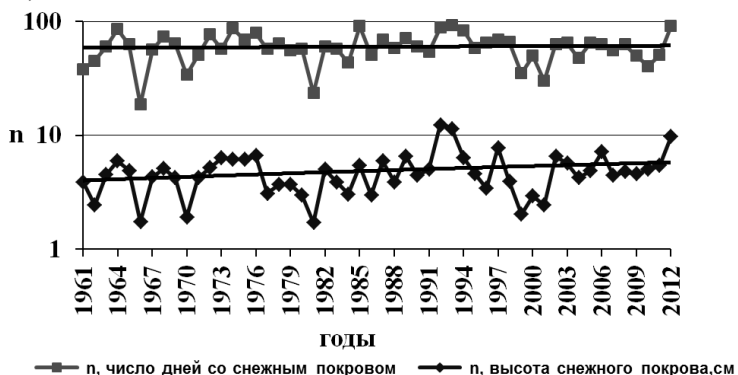


Рис. 2. Число дней со снежным покровом и среднедекадная высота снежного покрова на юге ЕТР в период 1961—2012гг.

В результате статистической обработки **дат начала/конца снежного** покрова в различных климатических зонах юга ЕТР были получены следующие осредненные даты начала/конца снежного покрова: на равнине — 24 ноября (19 дней) / 16 марта (15 дней); в предгорной зоне — 3 ноября (20 дней) / 25 марта (15 дней); в горной зоне — 24 ноября (19 дней) / 16 марта (15 дней). Самое раннее появления снежного покрова за исследованный период зафиксировано 29 сентября 2009 г. (Теберда), а самое позднее — 25 января 1991 г. (Каменноостский).

Смещение дат начала /конца снежного покрова на равнине и предгорной зоне статистически незначимы. В горной зоне происходит статистически значимое смещение даты начала появления снежного

покрова на более ранние сроки со скоростью 3,8 дня / 10 лет ($D = 7,9 \%$).

На юге европейской территории России, где устойчивый снежный покров продолжительностью от месяца и больше с небольшими перерывами явление редкое, ряды дат установления / разрушения устойчивого снежного покрова являются прерывистыми. Из табл. 6 следует, что минимальное количество сезонов с устойчивым снежным покровом наблюдалось на равнинной станции Изобильный (14 сезонов), а максимальное (39 сезонов) на горной станции Теберда.

Таблица 6

**Количество сезонов с устойчивым снежным покровом
за период 1961—2012 гг.**

| Станция | Высота над уровнем моря | Количество сезонов с устойчивым СП |
|----------------|-------------------------|------------------------------------|
| Изобильный | равнина | 14 |
| Прохладный | | 27 |
| Майкоп | | 17 |
| Нальчик | | 26 |
| Черкесск | предгорье | 31 |
| Ставрополь | | 37 |
| Владикавказ | | 37 |
| Кисловодск | | 31 |
| Каменноостский | | 23 |
| Теберда | горная | 39 |

На основе методики, описанной выше, аномальные значения **среднедекадной высоты снежного покрова** и дат начала / конца снежного покрова были определены за весь исследованный период (1961—2012 гг.), а также для базового (1961—1990 гг.) и

современного (1991—2012 гг.) периодов. В современный период наблюдалось увеличение количества экстремальных значений в 2,4 раза (10:24) (табл. 7).

Таблица 7

**Количество экстремумов
в рядах характеристик снежного покрова**

| Параметр | Период появления | Период | |
|---|---|--|-------------------------|
| | | 1961—1990 | 1991—2012 |
| Количество экстремумов среднедекадной высоты снежного покрова | октябрь-апрель | 10 | 24 |
| Количество экстремальных дат начала появления снежного покрова, годы их появления | Поздний: конец декабря – начало января | 3 (1967, 1969, 1982) | 1 (1997) |
| | Ранний: конец сентября– начало октября | 2 (1972, 1979) | 0 |
| Количество экстремальных дат конца схода снежного покрова, годы их появления | Ранний начало февраля, конец января | 6 (1966 г. на 3-х станциях, 1970, 1979, 1989) | 3 (2007, 2008, 2009) |
| | Поздний середина апреля | 2 (1961, 1987) | 1 (1993) |

Из анализа данных о **количестве дней со снежным покровом** следует, что эти ряды однородные, экстремумы отсутствуют. Исключения обнаружены на двух станциях:

- (1) на станции Ставрополь, на которой в сезоне 1965/1966 гг. зафиксировано экстремально малое количество дней со снежным покровом (16 дней);
- (2) на станции Нальчик, где на сезон 1973/1974 гг. пришлось экстремально большое количество дней со снежным покровом (118 дней).

В результате изменения количества экстремальных дат начала появления снежного покрова в базовый и современные периоды были выявлены экстремальные даты двух типов:

1) позднее начало (ниже порогового значения) появления снежного покрова, характеризующие аномально теплую позднюю осень и теплую раннюю зиму;

2) раннее начало появления снежного покрова (выше порогового значения), характеризующие аномально холодную осень.

В таблице 7 представлено распределение этих дат по подпериодам (1961—1990 гг. и 1991—2011 гг.) из которых следует, что 5 экстремальных дат приходилось на базовый период и лишь одна дата на современный период. При этом за весь исследованный период были зафиксированы четыре даты (конец декабря — начало января 1967, 1969, 1982 и 1997 гг.), характеризующие позднее наступление зимы и лишь две даты, указывающие на аномально холодную осень (конец сентября — начало октября 1972, 1979 гг.).

Из табл. 7 видно, что девять дат экстремально раннего схода снежного покрова (начало февраля 1966, 1970, 1979, 1989 гг., и конец января 2007, 2008, 2009 гг.) подтверждают процесс регионального потепления. Три экстремально поздние даты (середина апреля 1961, 1987, 1993 гг.) указывают на имевшее место позднее наступление весны.

Общей тенденцией в динамике изменения дат начала появления и конца схода снежного покрова является то, что наибольшее число выявленных экстремальных дат пришлось на базовый период 1961—1990 гг. с преимущественным появлением их с середины 70-х гг. прошлого столетия.

Выводы

На основе анализа характеристик снежного покрова на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов в период 1961—2012 гг. установлено:

1. Увеличение среднедекадной высоты снежного покрова во всех климатических зонах рассматриваемой территории (с максимальной скоростью роста высоты снежного покрова в предгорной зоне).

2. Уменьшение числа дней со снежным покровом на равнине, незначительное увеличение в предгорной зоне. На горной станции Теберда имел место статистически значимый тренд роста числа дней со СП на 5 дней/10 лет.

3. Незначительное смещение дат начала /конца снежного покрова на равнине и предгорной зоне в сторону более поздних дат и статистически значимое смещение дат начала СП в горной зоне (-3,8 дня/10 лет).

4. Смещение дат установления /разрушения устойчивого снежного покрова в сторону более поздних дат статистически незначимо во всех зонах, за исключением равнины. На равнине имел место статистически значимый тренд смещения даты разрушения устойчивого СП на 4,5 дня/10 лет в сторону более ранних сроков.

5. Динамика изменения количества экстремальных характеристик снежного покрова в базовый (1961—1990 гг.) и современный периоды (1991—2012гг.) имела следующие особенности:

а) в современный период наблюдалось увеличение количества экстремумов среднедекадной высоты снежного покрова примерно в 2,5 раза по сравнению с базовым;

б) количество экстремально поздних дат начала снежного покрова (теплая осень) превышало в 2 раза количество дат экстремально раннего начала снежного покрова (холодная осень);

в) количество экстремально ранних дат схода снежного покрова (теплая весна) в 3 раза превышало количество экстремально позднего схода снежного покрова (холодная весна).

Полученные результаты согласуются с выводами об изменении снежного покрова на территории России, представленные в Докладе Росгидромета (Второй оценочный доклад Росгидромета..., 2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ашабоков Б. А., Крученицкий Г. М., Кешева Л. А., Ташилова А. А., Шокуев Р. А. (2017). Моделирование полей параметров долговременной изменчивости снежного покрова южных федеральных округов России. / В сб.: Материалы Всероссийской конференции с Международным участием «Устойчивое развитие; проблемы, концепции, модели» 16—19 мая 2017. — Нальчик: КБНЦ РАН. С. 124—127.

Ашабоков Б. А., Ташилова А. А., Кешева Л. А. (2015). Климатические характеристики снежного покрова Северного Кавказа и их изменения в период глобального потепления / В кн.: Материалы Международной научно-практической конференции «Глобальные выводы современности и проблемы устойчивого развития юга России». Нальчик, КБНЦ РАН, 14—16 октября. 2015 — Нальчик: КБНЦ РАН. С. 258—264.

Бардин М. Ю., Платова Т. В. (2013). Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. С. 71—93.

Булыгина О. Н., Коршунова Н. Н., Разуваев В. Н. (2008). Критерии экстремальности климатических явлений в температурном режиме и режиме осадков на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып. 173. С. 120—125.

Бююль А., Цефель П. (2002). SPSS: искусство обработки информации. / Пер. с нем. под ред. Момота В. Е. — М.: ДиаСофтЮП.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. (2014). — Москва: Росгидромет. 61 с.

Глоссарий терминов. МГЭИК, (2001). Специальный доклад Рабочей группы III МГЭИК /под редакцией Б. Метца, О. Р. Дэвидсона и др. — Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press. 466 с.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. (2012). Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. — Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 194 с.

Доклад Первой рабочей группы Пятого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов (2012). www.ipcc.ch.

Кренке А. Н., Китаев Л. М., Турков Д. В. (2001). Климатическая роль изменений снежного покрова в период потепления // Известия РАН. Сер. геогр. № 4. С. 44—52.

Кешева Л. А. (2016). Математико-статистический анализ изменений режима осадков холодного периода в различных климатических зонах юга ЕТР и его прогноз методом сингулярно-спектрального анализа /Автореферат диссертации канд. физ.-мат. наук. Нальчик. ВГИ. 28 с.

Методические указания к IV части Справочника по климату СССР, раздел 2, Атмосферные осадки. (1964). — Л.: ГГО. 18 с.

Ташилова А. А., Кешева Л. А., Пишхачева И. Н., Таубекова З. А. (2014). Исследование изменения режима осадков и повторяемости их экстремальных значений на юге России / В кн.: Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 7—9 октября 2014. — Нальчик: ВГИ. С. 294—301.

Ташилова А. А., Кешева Л. А. (2012). Анализ высоты снежного покрова в предгорной части Северного Кавказа / В кн.: Международная научная конференция по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Казань, 2—4 октября 2012. — Казань: ПФГУ. С. 206—207.

УДК 551.50

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ОДНОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ И ЗЕМНОЙ ПОГОДЫ

О. М. Ступишина, Е. Г. Головина

Российский государственный гидрометеорологический университет,
Лаборатория «Погода и Человек»
Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98
olgastupishina@yandex.ru
goloveg@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.05.2018
Поступила после доработки 18.09.2018

Многие исследования показали, что изменения в циркуляции атмосферы могут быть связаны с проявлениями солнечной активности. В ряде работ предлагаются обоснования солнечно-атмосферных связей (Pudovkin, Veretenenko, 1996, 1997; Tinsley, Deen, 1991; Tinsley, 2008; Todd, Kniveton, 2001, 2004; Veretenenko, Ogurtsov, 2012; Nagovitsyn, 2014). Однако изучение факторов космической погоды, определяющих особенности циркуляции атмосферы, продолжает оставаться актуальным. Космическая погода — это термин, характеризующий совокупность явлений на Солнце, в околоземном космическом пространстве и межпланетной среде, оказывающих воздействие на процессы в магнитосфере, ионосфере и во всей атмосфере Земли (Владимирский, 2015).

В работе рассматривается методика и результаты изучения одновременной изменчивости характеристик циркуляции атмосферы и космической погоды, и оценка возможного влияния космической погоды на формирование погоды земной, в частности на формирование «периодов циркуляционной неустойчивости», когда

наблюдается ежедневная смена барических образований на временном промежутке, равном 7 дням и более.

Материал для исследования

Данные о состоянии атмосферы были получены для территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Для установления возможных солнечно-земных связей рассмотрены характеристики космической погоды в дни начала и окончания «периодов циркуляционной неустойчивости» (такие дни в дальнейшем именуется как «события»). Авторами проанализирована изменчивость характеристик космической и земной погоды за 16 лет (с 1999 по 2014 гг.). За рассматриваемый период выявлено 36 периодов неустойчивой атмосферной циркуляции. С использованием элементов метода наложенных эпох рассмотрена изменчивость космической и земной погоды в интервалах времени $+ / -10$ дней как со дня начала, так и окончания «периода циркуляционной неустойчивости» в атмосфере.

Материал для исследований формально был разбит на два блока:

I — космическая погода,

II — земная погода.

Условно были выделены 10 подблоков данных.

Космическая погода:

1 — подблок «SolarGlobalVariations» — суточные характеристики глобальных вариаций солнечной активности (СА): интегральный радиопоток на волне 10,7 см, число Вольфа, суммарная площадь пятен на диске Солнца, количество вновь образовавшихся пятен (Veretenenko, Ogurtsov, 2012);

2 — подблок «SolarFlares» — суточные характеристики вспышечной компоненты СА в различных диапазонах электромагнитного излучения (суммарное количество вспышек в оптическом, рентгеновском, и радио диапазонах (радиовсплески типа «шумовая буря» в метровом и дециметровом интервалах длин волн)) (Veretenenko, Ogurtsov, 2012);

3 — подблок «EarthVicinity» — вариации различных характеристики околоземного пространства: суточные статистики (медиана, экстремумы, размах, стандартное отклонение, коэффициенты вариации и осцилляции) потока электронов ($E > 2$ МэВ), протонов ($E > 1$ МэВ), фоновый поток рентгеновского излучения ($0,5—8 \text{ \AA}$; $1—8 \text{ \AA}$);

4 — подблок «Neutrons» — суточные вариации потока, регистрируемого нейтронным монитором, у поверхности Земли (отклонения от фона);

5 — подблок «GeoMagnetic» — вариации суточных статистик характеристик из подблока 3 «EarthVicinity», x-, y- и z-компонент геомагнитного поля.

Земная погода:

6 — подблок «AtmoElectricity» — вариации суточных статистик разброса характеристик электрического поля атмосферы (ЭПА): напряженности ЭПА и коэффициента униполярности (Nagovitsyn, 2014.);

7 — подблок «AtmoVaric» — вариации характеристик циркуляции атмосферы: суточные статистики (см. п. 3) атмосферного давления, облачности, скорости ветра;

8 — подблок «AtmoHumidity» — вариации характеристик влажности: суточные статистики (см. п. 3) относительной влажности, дефицита точки росы (Nagovitsyn, 2014);

9 — подблок «AtmoTemperature» — суточные статистики (см. п. 3) температуры воздуха;

10 — подблок «OxygenContent» — суточные статистики (см. п. 3) весового содержания кислорода в единице объема, рассчитанный из уравнения состояния сухой части воздуха (позволяет косвенно зарегистрировать изменение химического состава воздуха и одновременно принять его за комплексный метеорологический параметр).

Каждую из перечисленных характеристик рассматривалась как самостоятельный независимый параметр. Таким образом, в работу включено 129 параметров, описывающих состояние природной среды.

Методика исследования

Предложена методика, позволяющая:

— описать состояние комплекса возможных воздействующих факторов в целом;

— отобрать из большого количества входных параметров только те, которые различаются в случае соответствия разным событиям в атмосфере (началу и концу «периодов циркуляционной неустойчивости») и, следовательно, могут нести ответственность за формирование условий реализации этих событий.

Для достижения заявленных целей последовательно выполнялись следующие шаги:

Шаг 1. Каждый из параметров был преобразован посредством операции:

$$\chi = (\chi - \chi_{0,5\text{season}}) / \sigma_{\chi\text{season}} \quad (1),$$

где χ — статистическая характеристика рассматриваемого параметра,

$\chi_{0,5\text{season}}$ — медиана рассматриваемого параметра, вычисленная по выборке за рассматриваемый сезон,

$\sigma_{\chi\text{season}}$ — стандартное отклонение рассматриваемого параметра, вычисленное по выборке за сезон.

Процедура стандартизации дает сразу три преимущества:

— позволяет превратить комплекс возможных воздействующих факторов, каждый из которых свою размерность, в единую выборку, члены которой выражены в относительных (безразмерных) единицах отклонения от соответствующей медианы. Для такой выборки можно определить обычные описательные статистики (центра распределения и разброса) и описать, таким образом, комплекс факторов в целом.

— позволяет установить степень отклонения всего комплекса членов ряда от его сезонной нормы;

— позволяет сравнить между собой комплексы, относящиеся к разным событиям (в данной работе это — начало и конец «периодов

циркуляционной неустойчивости)), что дает возможность определить различия условий реализации этих событий.

Шаг 2. Для изучения динамики рассматриваемого процесса с применением метода наложенных эпох (МНЭ) исследовался временной интервал в ± 10 дней относительно дня события в атмосфере.

Шаг 3. Соответствие конкретного значения характеристик космической и земной погоды какому-либо событию в атмосфере (начало или конец «периода циркуляционной неустойчивости») определялось следующим образом: день регистрации определенного события описывался одинаковым набором характеристик — 129 параметров. Одна часть этих характеристик, относившихся к земной погоде, описывала состояние атмосферы в день исследуемого события, другая характеризовала состояние космической погоды, т. е. представляла собой комплекс возможных условий реализации рассматриваемых событий.

Шаг 4. С целью поиска дня максимального различия погодных комплексов исследовался интервал от минус 10-го дня до плюс 10-го дня метода МНЭ. Причиной поиска дня максимального различия являлось желание заложить достоверную базу для построения заблаговременного прогноза состояния космической погоды, связанной с определенным формированием циркуляции атмосферы. В данном случае удалось отказаться от классического аппарата МНЭ, предполагающего лишь сравнение статистик распределений наборов рассматриваемых параметров в разные дни интервала. Указанный набор параметров отвечает определению кластера в аппарате кластерного анализа. Этот факт позволил применить некоторые элементы этого метода, в частности, для определения расстояния между кластерами, что позволило вычислить из этих расстояний максимальное, и указать день его регистрации. В данной работе была использована формула эвклидова расстояния:

$$distance(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2),$$

где X и Y — кластеры параметров внешней среды, соответствующие различным событиям в атмосфере (события: начало и конец «периода циркуляционной неустойчивости»);

x_i и y_i — конкретные величины параметров погоды (стандартизованные на сезонную медиану каждого), принадлежащих определенному кластеру (набору указанных погодных параметров в день определенного события);

n — общее количество параметров в кластере.

Для корректного определения искомого межкластерного расстояния следует учесть направляющие косинусы параметров:

$$\cos \alpha_i = \frac{x_i - y_i}{\text{distance}(X, Y)} \quad (3)$$

и нормализовать искомое расстояние на максимальное значение этой величины по формуле (4), учитывая таким образом внутренний разброс в кластере, отраженный в формуле (5):

$$\cos \alpha_{\max} = \max_i (\cos \alpha_i) \quad (4)$$

$$\text{InnerDistance} = \sqrt{\left(\frac{\cos \alpha_{\max}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \text{Param} \frac{\cos^2 \alpha_i}{\sigma^2_i}}} * \frac{\cos \alpha_i}{\cos \alpha_{\max}} \right)^2} \quad (5)$$

Таким образом, получаем корректную величину межкластерного расстояния (см. формулу 6) и рейтинг исследуемых параметров по величинам их направляющих косинусов. Последнее позволяет отобрать параметры с направляющими косинусами, значения которых превышают 1 (т. е. одно межкластерное расстояние, полученное без учета внутреннего разброса). Это означает, что такие параметры достоверно различны при соответствии разным состояниям атмосферы и могут отвечать за формирование условий их реализации.

состояниям атмосферы и могут отвечать за формирование условий их реализации.

$$CorrectDistance = distance(X,Y) - (InnerDistance_x + InnerDistance_y) \quad (6)$$

В качестве дополнительного условия для отбора возможных факторов в данной работе ответственными за формирование условий реализации конкретных событий считались отдельные параметры космической погоды, которые не только максимально различались в дни максимального различия полных комплексов космической погоды, но и находились при этом в альтернативных категориях отношения к своей сезонной медиане (категории: меньше, равно, больше).

Результаты исследования

Следует отметить, что выбранный 16-летний отрезок времени соответствует фазам максимума и падения 23-го цикла СА и фазе роста 24-го цикла СА. В этот период максимальная повторяемость (63 %) неустойчивой погоды наблюдается в фазе максима СА, в 20 % наблюдается неустойчивость при падении СА и в 14 % — при росте СА (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Повторяемость «периодов неустойчивости» циркуляции атмосферы по фазам СА

| Фаза СА | Количество наблюдений | |
|----------|-----------------------|----|
| | ед. | % |
| рост | 5 | 14 |
| максимум | 22 | 63 |
| падение | 7 | 20 |
| минимум | 1 | 3 |

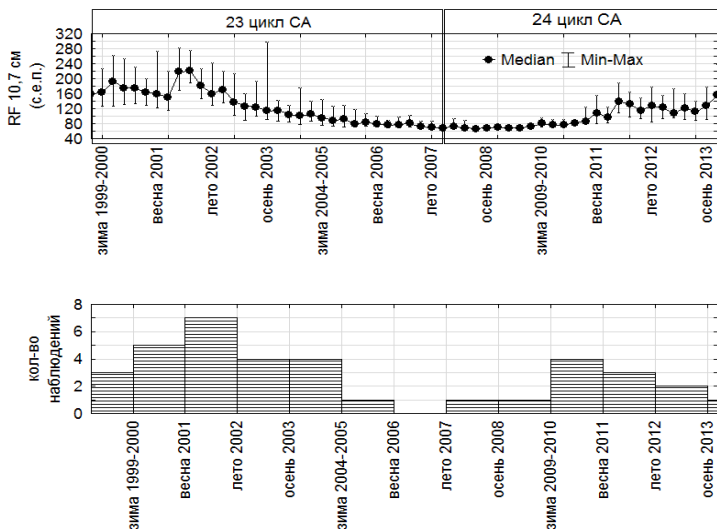


Рис. 1. Изменение индекса солнечной активности (интегральный поток излучения на волне длины 10,7 см) и повторяемости «периодов неустойчивости» циркуляции атмосферы.

Таблица 2

Повторяемость «периодов неустойчивости» атмосферы по сезонам

| Сезон года | Количество наблюдений | |
|------------|-----------------------|----|
| | ед. | % |
| весна | 8 | 23 |
| зима | 10 | 29 |
| лето | 9 | 26 |
| осень | 8 | 23 |

Наибольшая повторяемость рассматриваемых периодов наблюдалась в зимнее время (табл. 2). Начало периода неустойчивости отмечается преимущественно при формировании над исследуемым районом гребня (19 % случаев), малоградиентного поля высокого давления (22 %), малоградиентного поля низкого давления

(14 %). Заканчивались же такие периоды чаще всего малоградиентным полем низкого давления (25 %).

Таблица 3

Распределение повторяемости барических объектов, регистрируемых в дни начала и конца «периодов неустойчивости»

| Форма барического образования | Количество наблюдений | | | |
|--|--|----|---|----|
| | ед. | % | ед. | % |
| | <i>начало периода «циркулярной неустойчивости»</i> | | <i>конец периода «циркулярной неустойчивости»</i> | |
| циклон | 4 | 11 | 1 | 3 |
| антициклон | 4 | 11 | 6 | 17 |
| гребень | 7 | 19 | 5 | 14 |
| седловина | 4 | 11 | 4 | 11 |
| ложбина | 4 | 11 | 6 | 17 |
| малоградиентное поле высокого давления | 8 | 22 | 5 | 14 |
| малоградиентное поле низкого давления | 5 | 14 | 9 | 25 |

Условные подблоки параметров, члены которых достоверно различались в дни разных событий (начала и конца периодов) чаще всего описывали геомагнитные характеристики (блок космической погоды, подблок «GeoMagnetic») и характеристики состава воздуха (блок земной погоды, подблок «OxygenContent») (рис. 2, табл. 4). Факт совпадения одновременных вариаций геомагнитных характеристик с характеристиками состава воздуха соответствует результатам, полученным другими авторами.

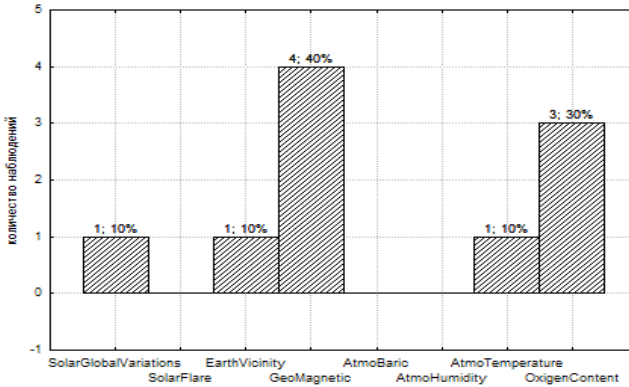


Рис. 2. Распределение параметров космической и земной погоды достоверно различавшихся в дни разных событий (начала и конца «периодов неустойчивости») по подблокам, принятым в данной работе.

Таблица 4

**Параметры земной и космической погоды,
достоверно различающиеся в дни разных событий**

| Земная погода | Космическая погода |
|--|---|
| Максимальное за сутки весовое содержания кислорода в единице объема | Число Вольфа |
| Минимальное за сутки весовое содержания кислорода в единице объема | Амплитуда напряженности у-компоненты геомагнитного поля (за сутки) |
| Среднее за сутки весовое содержания кислорода в единице объема | Максимальная за сутки напряженность у-компоненты геомагнитного поля |
| Коэффициент осцилляции весового содержания кислорода в единице объема за сутки | Медианная за сутки напряженность z-компоненты геомагнитного поля |
| Коэффициент вариации температуры воздуха за сутки | Коэффициент вариации напряженности x-компоненты геомагнитного поля (за сутки) |

Следует отметить появление в списке такого индекса СА, как число Вольфа, и отсутствие различающихся параметров интегрального радиопотока на волне 10,7 см. Как уже было сказано, поведение отдельных индексов СА не всегда совпадает, это связано с некоторыми особенностями процессов на Солнце, которые они характеризуют. Кроме того, следует отметить выявление характеристик всех трех компонент геомагнитного поля.

Оценка состояния полного комплекса космической погоды в дни максимального различия таких комплексов при соответствии их различным событиям (начало и конец периодов) в настоящей работе приведена для зим в максимуме СА, так как именно зимой наиболее часто наблюдались «периоды циркулярной неустойчивости» (рис. 3).

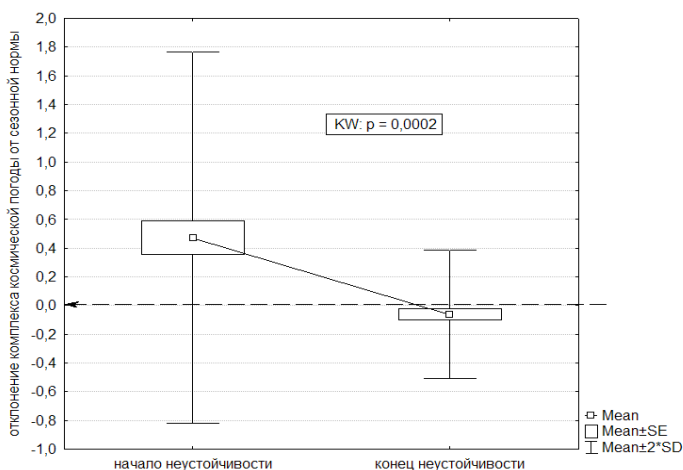


Рис. 3. Отклонение комплекса космической погоды от сезонной нормы рассматриваемого периода времени в дни начала и окончания периода неустойчивости состояния атмосферы.

Как видно из приведенного рисунка, полные комплексы космической погоды достоверно (уровень значимости по критерию

Крускала—Уоллиса при нулевой гипотезе сходства распределений ($p = 0,0002$) различались при соответствии началу и концу периодов.

Начало периодов характеризовались значениями космических параметров, в среднем превышающих свою сезонную медиану при большом разбросе вокруг нее, тогда как окончаниям периодов соответствовали величины космических параметров, приближенные к своей сезонной норме. Максимальные различия отмечались во +2-й и в +5-й день, что позволяет сделать предположение о влиянии факторов, происходящих на фронте зарегистрированных изменений в параметрах космической погоды, включенных в данное исследование. Выявление этих факторов является отдельной задачей и выходит за рамки данной работы.

Заключение

Разработанный метод исследования одновременной изменчивости параметров мультидисциплинарной базы данных позволил проанализировать параметры космической погоды, изменяющиеся в различные периоды циркуляции атмосферы, в частности, в периоды формирования длительной неустойчивости, при которой наблюдается изменение барических систем в районе Санкт-Петербурга.

В рассмотренный временной интервал «периоды неустойчивости» чаще всего образовывались зимой при максимуме солнечной активности.

День максимального различия комплексов космической погоды большей частью приходится на интервал времени "после события".

Состав параметров, характерных для начала и конца «периодов неустойчивости», может стать основой для создания прогностической базы вариаций космической и земной погоды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Владимирский Б. М. (2015). Космическая погода и биосфера — история исследований и современность — М.: URSS. 112 с.

Pudovkin M. I., Veretenenko S. V. (1996). Variations of the cosmic rays as one of the possible links between the solar activity and the lower atmosphere // *Adv. Space*. V. 17 (11). P. 161—164.

Pudovkin M. I., Veretenenko S. V., Pellinen R., Kyr O. E. (1997). Meteorological characteristic changes in the high-latitude atmosphere associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays // *Adv. Space Res.* 20 (6), P. 1169—1172.

Tinsley B. A., Deen G. W. (1991). Apparent tropospheric response to MeV–GeV particle flux variations: a connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds // *J. Geophys. Res.* 96. P. 283—296.

Tinsley B. A. (2008). The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics // *Rep. Prog. Phys.* 71 (6). P. 66801—66900.

Todd M. C., Kniveton D. R. (2001). Changes in cloud cover associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.* 106 (D23). P. 32031—32041.

Todd M. C., Kniveton D. R. (2004). Short term variability in satellite-derived cloud cover and galactic cosmic rays: an update // *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 66. P. 1205—1211.

Veretenenko S. V., Ogurtsov M. G. (2012). Regional and temporal variability of solar activity and galactic cosmic ray effects on the lower atmosphere circulation // *Adv. Space Res.* 49 (4). P. 770—783.

Nagovitsyn Yu. A. (2014). Specific features in the effect of solar activity on the Earth's climate changes. // *Geomagn. Aeron.* V. 54. № 8. P. 1010—1013.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ВОЗДУХА И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ

П. Л. Стерхов

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

Поступила в редакцию 3.03.2019
Поступила после доработки 8.04.2019

Введение

Годовой ход электрической проводимости воздуха для континентальных станций характеризуется низкими значениями проводимости в холодный период года и более высокими — в теплый (Зайнетдинов, 2018; Попов, 2011; Соколенко, Шварц, 2003).

В работах Б. Г. Зайнетдинова и И. Б. Попова утверждается, что годовой ход проводимости воздуха на станциях Диксон, Тикси и Воейково формируется за счет сезонных изменений интенсивности эманаций радиоактивных газов земной коры. Выводы основаны на утверждении П. Н. Тверского для Слуцка (Павловской магнитной и метеорологической обсерватории) о соответствии годового хода проводимости воздуха его радиоактивности (Тверской, 1949).

По данным о годовом ходе проводимости воздуха и его радиоактивности для Слуцка коэффициент корреляции среднемесячных значений проводимости воздуха и концентрации радона составляет около 0,2. Это не дает оснований для утверждения о формировании годового хода проводимости воздуха исключительно за счет сезонных изменений интенсивности эманаций радона из земной поверхности. Для годового хода проводимости воздуха на станции Восток в Антарктиде, который соответствует общему

правилу: высокие значения летом, низкие — зимой, аналогичный вывод о формировании годового хода проводимости воздуха за счет сезонных изменений интенсивности эманацій радиоактивных газов также представляется малоприменимым (Соколенко, Стерхов, 2017).

В общем случае ионизационное состояние атмосферы определяется как интенсивностью ионизации, так и скоростью поглощения легких ионов аэрозолями. Некоторое численное представление о концентрации аэрозолей в атмосфере позволяет получить метеорологическая дальность видимости, которая является параметром метеорологических наблюдений. Таким образом, возможно на основе сравнения временных рядов наблюдений проанализировать связь проводимости воздуха с метеорологической дальностью видимости, как фактором, указывающим на интенсивность поглощения легких ионов аэрозолями оптического диапазона.

Характеристика данных и аппаратуры

В работе используются данные наблюдений электрических характеристик атмосферы на станции Воейково в период 1989—1996 гг. (Попов, Соколенко, 2012), данные наблюдений электрических характеристик атмосферы на станции Восток в Антарктиде, метеопараметры на станции Санкт-Петербург по данным сети Росгидромета и метеопараметры на станции Восток по данным Арктического и антарктического научно-исследовательского института.

Метеорологическая дальность видимости на станциях Восток и Санкт-Петербург определяется визуально, причем на станции Санкт-Петербург — только в светлое время суток.

Прибор проводимости воздуха «Электропроводность», разработанный в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, состоит из ионизационной камеры открытого типа и электронного усилителя. Калибровка прибора на станции Восток производилась переменным током с помощью генератора линейного напряжения.

Годовой ход проводимости воздуха и видимости

На рисунке 1 приведены среднемесячные значения удельной суммарной проводимости воздуха $L+L_*$ за период январь 1989 — июль 1996 гг. и соответствующие значения метеорологической дальности видимости V на станции Воейково (Санкт-Петербург).

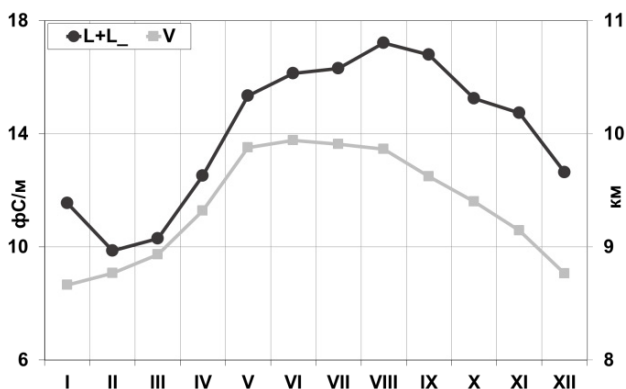


Рис. 1. Средний годовой ход $L+L_*$ и V на станции Воейково за период январь 1989 — июль 1996 гг., $k(L+L_*; V) = 0,9$.

В годовом ходе проводимости воздуха и дальности видимости наблюдается четко выраженный максимум в летние месяцы. Коэффициент корреляции (k) месячных значений ($L+L_*$ и V) составляет 0,9. Годовые коэффициенты корреляции, рассчитанные на основании среднемесячных значений $L+L_*$ и V , на станции Воейково (Санкт-Петербург) в период 1989—1995 гг. колеблются в пределах от 0,5 до 0,9 (см. рис. 2).

На рис. 3 и 4 представлены среднемесячные значения $L+L_*$ и V на станции Восток, полученные в 1989—1992 гг. в периоды 34-й и 36-й советских антарктических экспедиций (САЭ). Коэффициенты корреляции для удельной суммарной проводимости воздуха и метеорологической дальности видимости составляют 0,7 по материалам наблюдений 34-й САЭ и 0,8 для 36-й САЭ.

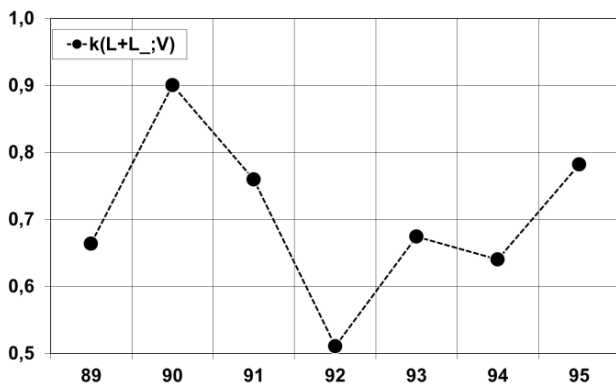


Рис. 2. Годовые $k(L+L-, V)$ на станции Воейково в период 1989—1995 гг.

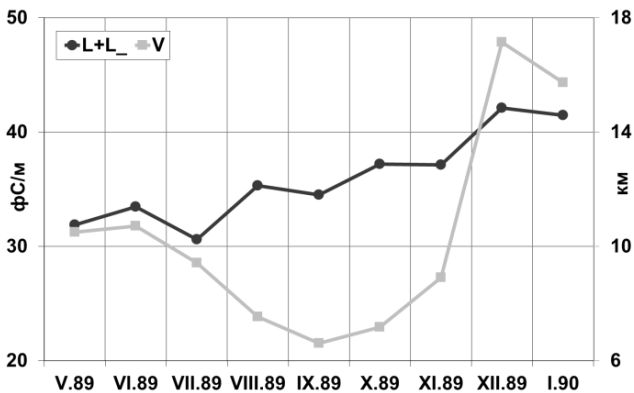


Рис. 3. Среднемесячные значения $L+L-$ и V на станции Восток в период 1989—1990 гг.,
 $k(L+L-, V) = 0,7$.

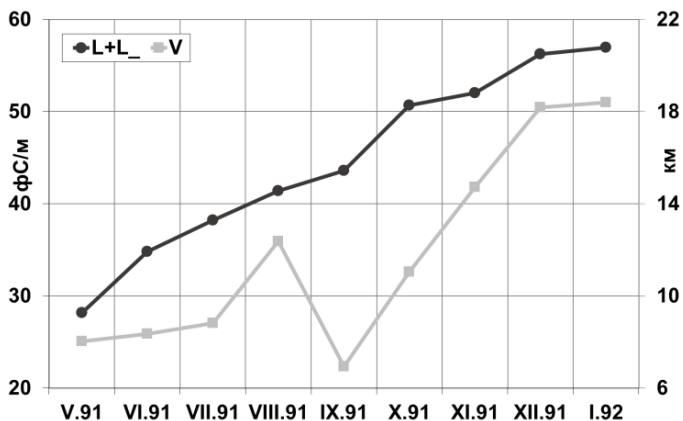


Рис. 4. Среднемесячные значения $L+L_$ и V на станции Восток в период 1991—1992 гг., $k(L+L_;V) = 0,8$.

Годовой ход проводимости воздуха и метеорологической дальности видимости на станции Восток, как и на станции Воейково, четко выражен, высокие значения рассматриваемых параметров наблюдаются летом, низкие — зимой.

Многолетний ход проводимости воздуха и видимости

Изменения проводимости воздуха в период 1957—1977 гг. определяются, в основном, последствиями испытаний ядерного оружия в атмосфере, а в более поздние годы — подъемами и спадами промышленного производства в СССР и Российской Федерации, как источника антропогенного аэрозольного загрязнения атмосферы (Огуряева, Шварц, 1982; Морозов и др., 2009).

База данных «Атмосферное электричество» содержит информацию, начиная с 1989 г. (Попов, Соколенко, 2012). Данные за более ранние годы на технические носители не переведены, однако для станции Воейково они представлены в работе В. Н. Морозова с соавторами (2009).

Среднегодовые значения удельной суммарной проводимости воздуха и соответствующие значения метеорологической дальности видимости на станции Воейково (Санкт-Петербург) в период 1978—1995 гг. приведены на рисунке 5. Ход проводимости воздуха идентичен ходу метеорологической дальности видимости, коэффициент корреляции достаточно высок и составляет 0,9. Для обоих параметров характерны низкие значения в середине 80-х годов и максимальные — в 1993—1995 гг. Абсолютный максимум обеих рассматриваемых величин отмечен в 1995 году.

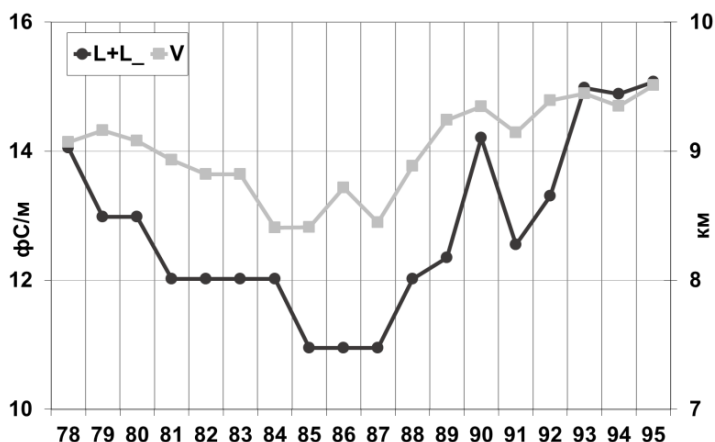


Рис. 5. Среднегодовые значения $L+L_$ и V на станции Воейково в период 1978—1995 гг.,
 $k(L+L_;V) = 0,9$.

Для станции Восток сопоставлены средние значения удельной суммарной проводимости воздуха и метеорологической дальности видимости, полученные во втором полугодии 1989, 1990 и 1991 годов по наблюдениям 34-й и 36-й САЭ (см. рис. 6). Увеличение проводимости воздуха во второй половине 1991 г. по сравнению с аналогичным периодом 1989 г. хорошо согласуется с увеличением метеорологической дальности видимости.

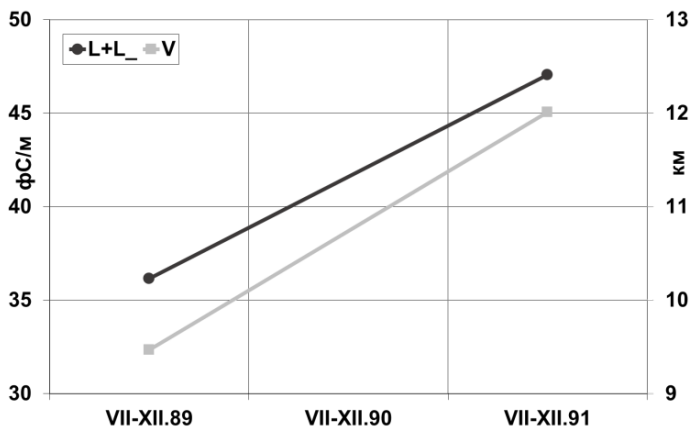


Рис. 6. Средние за вторые полугодия значения $L+L_$ и V на станции Восток.

Результаты исследования

Годовой ход удельной суммарной проводимости воздуха и метеорологической дальности видимости на континентальных станциях имеет выраженный циклический характер и связан с сезонами года: для лета характерны высокие значения проводимости воздуха и видимости, для зимы — низкие.

Годовой и многолетний ход проводимости воздуха в приземном слое атмосферы хорошо согласуется с метеорологической дальностью видимости. При осреднении годового хода этих величин за 6 лет по станции Воейково в случае, когда по июль 1996 г. наблюдения проводились в пункте, который в полной мере соответствовал РД 52.04.168-88, коэффициент корреляции составляет 0,9.

Для среднегодовых значений этих величин в период 1978—1995 гг. (18 лет) по станции Воейково коэффициент корреляции также равен 0,9. Коэффициенты корреляции этих величин в период 1989—1995 гг. по станциям Восток и Воейково колеблются в пределах 0,5—0,9, что говорит об устойчивости этой связи.

Связь годового хода проводимости воздуха и годового хода концентрации радона в воздухе по данным, приведенным в работе П. Н. Тверского, имеет более низкое значение коэффициента корреляции — 0,2 и не является определяющим универсальным фактором формирования годового хода проводимости воздуха.

Выводы

Годовой ход проводимости воздуха на континентальных станциях формируется не источниками ионизации атмосферы, а поглощением легких ионов аэрозолями видимого диапазона, концентрация которых связана с метеорологической дальностью видимости. С учетом схожести процесса поглощения легких ионов аэрозолями, как на северо-западе ЕТР (ст. Воейково), так и в Антарктиде (ст. Восток), следует полагать, что эти аэрозоли имеют природный характер. Поглощение легких ионов аэрозолями видимого диапазона также является основным фактором формирования многолетнего хода проводимости воздуха за пределами периода испытаний ядерного оружия в атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зайнетдинов Б. Г. (2018). Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе // Труды ГГО. Вып. 588. С. 47—61.

Морозов В. Н., Попов И. Б., Снегуров А. В., Снегуров В. С., Соколенко Л. Г., Шварц Я. М. (2009). Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз // Труды ГГО. Вып. 560. С. 213—242.

Огуряева Л. В., Шварц Я. М. (1982). Основы построения сети наблюдений за электрическими свойствами атмосферы // Труды ГГО. Вып. 463. С. 118—128.

Попов И. Б. (2011). Особенности вариаций электрической проводимости воздуха вблизи Санкт-Петербурга // Труды ГГО. Вып. 563. С. 149—165.

Попов И. Б., Соколенко Л. Г. (2012). РСБД «Атмосферное электричество». Свидетельство о госрегистрации базы данных № 2013620672 от 04.06.2013 г.

РД 52.04.168-88. Методические указания. Наблюдения за атмосферным электричеством на станциях наземной метеорологической сети. — СПб: Гидрометеоиздат. 58 с.

Соколенко Л. Г., Стерхов П. Л. (2017). Годовые вариации напряженности электрического поля атмосферы и полярных проводимостей воздуха на станции Восток // Труды ГГО. Вып. 587. С. 116—124.

Соколенко Л. Г., Шварц Я. М. (2003). Результаты многолетних измерений градиента потенциала электрического поля атмосферы и удельных полярных электрических проводимостей воздуха в приземном слое на территории России // В сб.: Труды V Российской конференции по атмосферному электричеству. — Владимир. С. 133—136.

Тверской П. Н. (1949). Атмосферное электричество. — Л.: Гидрометеиздат. 252 с.

МАРИЯ ВАСИЛЬЕВНА ЗАВАРИНА

(1909—1977)

К 110-летию со дня рождения



6 октября 2019 года исполняется 110 лет со дня рождения Марии Васильевны Завариной — яркой представительницы плеяды советских ученых, активно развивавших метеорологическую науку в 50—70-х годах XX столетия. Ее жизненный путь был очень характерен для образованной молодежи того времени.

М. В. Заварина родилась в 1909 году в селе Шуйском Вологодской губернии в крестьянской семье. В 1926 г. закончила школу. Некоторое время работала «избачём» в избе-читальне. После окончания в 1927 г. педагогических курсов при Вологодском техникуме стала заведовать школой первой ступени. Принимала активное участие в «ликвидации безграмотности». С 1930 по 1932 год заведовала библиотекой при

Доме ученых г. Ростова-на-Дону. С 1933 по 1935 гг. училась в Ростовском государственном университете, а с 1935 г. продолжила образование на механико-математическом факультете Ленинградского государственного университета, который закончила с отличием в 1938 г., получив диплом с квалификацией «механика». В том же году устроилась на работу в отдел аэрологии ГГО на должность младшего научного сотрудника и уже в 1939-м поступила в аспирантуру ГГО.

С началом Великой Отечественной войны вместе с ГГО эвакуировалась в Свердловск, где в 1944 г. защитила диссертацию на степень кандидата физико-математических наук по теме «Исследование изменчивости ветра в свободной атмосфере».

В работе была решена задача по нахождению «радиуса действия» аэрологических станций. На практике это означало определение ошибки пространственной экстраполяции и интерполяции скорости и направления ветра в условиях редкой наблюдательной сети. Были даны рекомендации по размещению аэрологических станций и расстоянию между ними (ориентировочно 200 км).

В 1959 г. Мария Васильевна защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора географических наук и с 1960 г. возглавила сектор в отделе климата ГГО. В 1963 г. ей было присвоено ученое звание профессора.

Основным направлением научных исследований М. В. Завариной была прикладная климатология: ею были разработаны теоретические основы и практические рекомендации по расчету скоростей и направлений ветра на высотах, гололедно-изморозевых нагрузок на высотные сооружения и линии электропередач, сделано районирование территории СССР по зонам обледенения и болтанки самолетов. Всего Мария Васильевна написала и опубликовала около 170 научных работ, в том числе ряд монографий: «Аэроклиматические факторы обледенения самолетов» (1960 г.), «Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы» (1971 г.), «Рекомендации по расчету климатических параметров на провода воздушных линий» (1974 г.), «Рекомендации по расчету гололедных нагрузок на высотные сооружения» (1976 г.). В монографии «Строительная

климатология» (1977 г.) ею был обобщен опыт многих советских климатологов по обеспечению экономики страны необходимой информацией, включая внедрение этой информации в государственные стандарты СССР. Эта книга до настоящего времени является настольной для строителей и климатологов. В связи с этим надо отметить, что М. В. Заварина придавала очень большое значение внедрению климатологических знаний в практику. Она подготовила ряд серьезных научно-популярных публикаций, посвященных строению атмосферы, вопросам исследования засух и методам борьбы с ними, а также описанию жизни и научной деятельности выдающихся ученых А. И. Воейкова и М. А. Рыкачева.

Много времени Мария Васильевна уделяла педагогической деятельности и подготовке кадров: читала лекции в Ленинградском и Одесском гидрометеорологических институтах, Казанском

и Томском государственных университетах; под ее руководством защитили кандидатские диссертации десятки аспирантов, а четыре ее ученика — М. М. Борисенко, В. Г. Глухов, О. А. Подрезов и Р. П. Бернгардт — стали докторами наук.

М. В. Заварина являлась членом рабочих групп ВМО по технической климатологии, членом комиссий по климатологии стран СЭВ, а также докладчиком на многих международных конференциях.

Ее деятельность была отмечена медалями «За победу над Германией», «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.», «За трудовую доблесть», почетными грамотами Президиума Верховного Совета СССР и Гидрометеослужбы СССР, знаком «Отличник Гидрометслужбы СССР», медалями ВДНХ.

Мария Васильевна Заварина по праву занимает достойное место среди видных климатологов Советского Союза.

*Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
К. Ш. Хайруллин, М. З. Образцова
E-mail: khairullink@mail.ru,
obraztsova.maria@gmail.ru*

ЛАРИСА РАКИПОВНА РАКИПОВА

К 100-летию со дня рождения

Л. Р. Ракипова родилась 29 июня 1919 года на станции Ротомка Минского района в Белоруссии. Отец был наборщиком в типографии, позже журналистом, затем редактором Каракалпакского государственного издательства, мать — домохозяйкой.

В 1941 году Лариса Ракиповна закончила физический факультет Ленинградского государственного университета по специальности «геофизика», затем два года

(1941—1943) работала техником в Ташкентской геофизической обсерватории, а с 1943 г. инженером в Главной геофизической обсерватории, которая во время войны находилась в эвакуации в Свердловске. В 1944 г. вместе с Обсерваторией вернулась в Ленинград, в 1947 г. закончила аспирантуру, в 1949 защитила кандидатскую диссертацию, в 1959 — докторскую, и в 1975 г. ей было присвоено ученое звание «профессор».

За время работы в ГГО прошла путь от старшего научного сотрудника до заведующего лабораторией (с 1962 г.) в отделе динамической метеорологии, а затем в отделе гелиогеофизических исследований. До выхода на пенсию Лариса Ракиповна возглавляла научное направление, посвященное атмосферной термодинамике и гелиогеофизике.

Исследования Ларисы Ракиповны были направлены на разработку компенсационного механизма теплового и циркуляционного взаимодействия различных слоев атмосферы: тропосферы, стратосферы и мезосферы, а также расчет потоков тепла и влаги в этих слоях. Последние годы своей деятельности она посвятила изучению физических основ механизма влияния солнечной активности на климат. Ею были получены количественные оценки изменения температуры высоких слоев атмосферы в 11-летнем цикле солнечной активности, а также рассчитаны гидротермические эффекты протонных вспышек. Одновременно Л. Р. Ракипова разработала метод прогноза среднемесячных аномалий температуры.

Л. Р. Ракипова активно участвовала в международных мероприятиях по актуальным проблемам исследования атмосферы: международном симпозиуме по солнечно-атмосферным связям (1966, Югославия), конференции, посвященной «Международному году спокойного солнца» (1967, Англия), радиационном симпозиуме ВМО (1968, Норвегия), конференции «Программы оценок воздействия на климат» (США, 1975), симпозиуме ВМО по атмосферному озону (1976, ГДР), конференции по моделям общей циркуляции океанов и их связи с климатом (1977, Финляндия). В 1978 и 1979 гг. в США представляла результаты совместных исследований о возможных физических механизмах связи «Солнце—атмосфера» и влиянии двуокиси углерода на климат.

Ею были опубликованы 90 научных работ, важнейшими из которых являются монографии «Тепловой режим атмосферы» (1957 г.) и «Динамика верхних слоев атмосферы» в соавторстве с Л. К. Ефимовой (1975 г.), а также статьи, посвященные моделированию динамического и термического взаимодействия между тропосферой, стратосферой и мезосферой, озонному механизму влияния солнечной активности на климат, исследованию связи зимних стратомезосферных потеплений и тропосферных процессов средних широт.

В 1945 г. Лариса Ракиповна была награждена медалями «За победу над Германией» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.», в 1968 г. — знаком «Отличник Гидрометслужбы СССР», в 1970 — медалью «За доблестный труд», в 1976 — медалями «30 лет Победы в Великой Отечественной войне» и «Ветеран труда».

*Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
К. Ш. Хайруллин, М. З. Образцова
E-mail: khairullink@mail.ru,
obraztsova.maria@gmail.ru*

Исследование динамики электрической структуры грозоградового кучево-дождевого облака по данным трехмерного численного моделирования (на примере северо-запада России). Довгалюк Ю.А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л. Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 7–22.

С помощью доработанной численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака выполнено моделирование сильного градобития, наблюдавшегося в Санкт-Петербурге 22 июля 2017 г. Рассчитывались и сравнивались между собой два случая: без учета и с учетом гетерогенного замерзания облачных капель. При учете данного процесса наблюдается более интенсивная электризация облака и разделение зарядов. В 2—3 раза увеличивается частота молниевых разрядов. Полярность облака инвертируется (отрицательный заряд вверху, положительный внизу). Этот эффект получен авторами с помощью трехмерной модели впервые. Электрические процессы в облаке слабо влияют на возникновение опасных явлений погоды (ливень, град).

Ключевые слова: облако, электризация, гроза, осадки, град, опасные явления

Табл. 2. Ил. 5. Библ. 9.

УДК.551.594.21

Взаимодействие облачных зарядовых структур с окружающей проводящей атмосферой с неоднородной электрической проводимостью. Морозов В. Н. Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 23–79.

Рассматриваются в стационарном и нестационарном приближении задача о вычислении электрического поля облачной зарядовой структурой за пределами облака с учетом скачков электрической проводимости на границе «облако — свободная атмосфера». Для частных случаев пространственного распределения электрических облачных зарядов получены приближенные выражения для напряженности электрического поля вне облака.

Полученные теоретические результаты могут играть важную роль в интерпретации наземных и самолетных измерений электрических полей облаков.

Ключевые слова: электрические поля атмосферы и облаков, напряженность электрического поля электрическая проводимость атмосферы и облаков, частота колебаний электрического тока.

Библ. 15.

УДК 551.51

Сопоставление эффективности обнаружение метеорологических объектов двумя доплеровскими радиолокаторами на территории Ленинградской области. Восканян К. Л., Заморин И. С., Крюкова С. В., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., Солонин А. С. Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 80–97.

Рассматривается эффективность алгоритмов, использованных в двух доплеровских метеорологических радиолокаторах ДМРЛ при распознавании опасных погодных явлений. Выполнен анализ влияния расстояния и азимута метеоявления, количества случаев с осадками и грозами на показатели эффективности их обнаружения. Построено пространственное распределение вероятности «ложных тревог» и пропусков гроз двух ДМРЛ, локализованы области с максимумами вероятностей.

Ключевые слова: опасные явления погоды, доплеровские метеорологические радиолокаторы, обнаружение опасных явлений погоды.

Табл. 3. Ил. 9. Библ. 13.

УДК 551.510.04

Результаты внедрения новых методик в лабораториях сети мониторинга загрязнения атмосферы Росгидромета. Ковачева Е. В., Шарикова О. П., Гуревич И. Г. Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 98–112.

Приведены результаты внедрения новых методик в лабораториях сети мониторинга загрязнения атмосферы (МЗА) Росгидромета. Для оценки качества анализа проб в сетевых лабораториях мониторинга загрязнения атмосферного воздуха (ЛМЗА) Росгидромета после внедрения новых методик использован анализ результатов внешнего контроля как важного фактора оценки достоверности наблюдений на сети МЗА. Проведены анализ и сравнение результатов внешнего контроля за период с 2016 по 2018 гг. (с использованием новых методик) с результатами внешнего контроля за период с 2009 по 2014 гг. (по старым методикам) на сети МЗА Росгидромета по ряду примесей. Представленные результаты свидетельствуют о росте качества анализа проб в сетевых ЛМЗА Росгидромета с внедрением новых методик.

Ключевые слова: мониторинг загрязнения атмосферы, методики измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

Табл. 3. Ил. 4 . Библ. 19.

УДК 551.509.68

Прогноз пожароопасности для Европейской территории России на основе гидродинамического прогноза полей метеорологических величин. Ладохина Е. М., Анискина О. Г. Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 113–128.

Рассмотрены и проанализированы индексы, на основе которых можно прогнозировать пожароопасность по условиям погоды. Описана, созданная система прогноза пожароопасных ситуаций на основе результатов гидродинамического моделирования атмосферных процессов с использованием гидродинамической мезомасштабной модели WRF.

Ключевые слова: пожароопасность, индексы, гидродинамическое моделирование.

Табл. 3. Ил. 2. Библ. 13.

УДК [551.553.8+551.509.322](470.55/.58)

Условия возникновения и прогнозирование штормового ветра в районе городов Орска и Петропавловска на территории Южно-Уральской железной дороги. Выходцева Е. А., Новикова Н. А., Иванова И. А., Дробжева Я. В. Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 129–140.

Представлены результаты анализа прогнозов скорости ветра в городах Орск и Петропавловск, полученные на основе метода Н. А. Лебедевой. Результаты расчета критериев успешности прогнозирования скорости ветра за период 2008—2017 гг. для городов Орск и Петропавловск показали, что метод Н. А. Лебедевой является эффективным для прогноза штормовых значений ветра.

Ключевые слова: ветер, метод, прогноз, успешность.

Табл. 4. Ил. 1. Библ. 10.

Изменения характеристик снежного покрова на юге ЕТР как отклик глобального потепления. Ашабоков Б. А., Ташилова А. А., Кешева Л. А. Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 141–158.

По данным рядов характеристик снежного покрова (СП) холодных сезонов за период 1961-2012 гг. на юге европейской территории России (ЕТР) получены описательные статистики, аномальные значения, скорости изменения характеристик снежного покрова с 1961 г. и с 1976 г. по 2012г.(начало глобального потепления). Определена статистическая разница (Т-тест) средних значений исследуемых метеопараметров и соответствующих климатических норм. Построены линейные тренды характеристик снежного покрова. Получено, что за исследованный период наблюдалась тенденция роста среднедекадной высоты снежного покрова и тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова.

Ключевые слова: среднедекадная высота снега, сезонная приземная температура воздуха, линейный тренд, коэффициент корреляции, объясненная дисперсия.

Табл. 2. Ил. 8. Библ. 11.

УДК 551.50

Результаты анализа одновременной изменчивости параметров космической и земной погоды. Ступишина О. М., Головина Е. Г. Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 159–171.

Рассмотрена изменчивость состояния атмосферы при одновременном изменении основных характеристик космической погоды. В работе используются суточные статистики параметров внешней среды, стандартизованные на их сезонную медиану, и выполнены исследования с использованием метода наложения эпох и некоторых элементов кластерного анализа. Результаты расчетов позволили сделать выводы о связи периодов формирования неустойчивой погоды в атмосфере района г. Санкт-Петербурга с фазами максимума солнечной активности.

Ключевые слова: космическая и земная погода, солнечная активность, кластерный анализ, период неустойчивости земной погоды.

Табл. 4. Ил. 3. Библ. 9.

УДК 551.506.5

Электрическая проводимость воздуха и метеорологическая дальность видимости. Стерхов П. Л. Труды ГГО, 2019. Вып. 592. С. 172–180.

Представлены среднемесячные и среднегодовые значения удельной суммарной проводимости воздуха на станции Воейково и на станции Восток в Антарктиде, полученные в 34-й и 36-й советских антарктических экспедиций. Рассмотрены данные за 1978 – 1996. Выполнено сравнение проводимости воздуха с метеорологической дальностью видимости и установлена взаимосвязь этих величин при формировании годовых и многолетних вариаций.

Ключевые слова: проводимость воздуха, метеорологическая дальность видимости, среднемесячные и среднегодовые значения.

Ил. 6. Библ. 9.

Investigation of the Electrical Structure of Cb with Hail using Three-dimensional Numerical Simulation (based on the case, observed in the north-west of Russia). Dovgalyuk Yu. A., Veremey N. E., Sinkevich A. A., Mikhailovsky Yu. P., Toropova M. L. Proceedings of MGO. 2019. V. 592. P. 7–22.

Numerical simulation of severe thunderstorm with hail, observed in Saint-Petersburg on 2017 July 22, was performed using modified numerical non-stationary three-dimensional model. Two cases were compared: without (1) and with (2) heterogeneous cloud droplets freezing. While taking this process into an account more intensive cloud electrification and charge separation is observed. The frequency of lightning discharges increases in 2—3 times. The polarity of the cloud becomes inverted (negative charge at the top, positive at the bottom). This effect was obtained for the first time by the authors, using a three-dimensional model. Electrical processes in the cloud have small effect on the occurrence of dangerous weather phenomena (rain, hail).

Keywords: cloud, electrification, thunderstorm, precipitation, hail, dangerous phenomena.

Tab. 2. Fig. 5. Ref. 9

The interaction of cloud charge structures with the surrounding conducting atmosphere with non-uniform electrical conductivity. Morozov V. N. Proceedings of MGO. 2019.V. 592. P. 23–79.

In the stationary and non-stationary approximations, the problem of calculating electric field by a cloud-based charge structure outside the cloud with allowance for electrical conductivity jumps at the cloud-free atmosphere boundary. For particular cases of the spatial distribution of electric cloud charges, we obtain approximate expressions for the electric field strength outside the cloud. The obtained theoretical results can play an important role in the interpretation of ground and aircraft measurements of the electric fields of clouds.

Keywords: electric fields of the atmosphere and clouds, electric field intensity, electrical conductivity of the atmosphere and clouds, oscillation frequency of the electric current of the cloud.

Ref. 15.

Comparison of the efficiency of detection of meteorological objects by two Doppler radars in the territory of the Leningrad Region. Voskanyan K. L., Zamorin I. S., Kryukova S. V., Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S., Simakina T. E., Solonin A. S. Proceedings of MGO. 2019. V. 592. P. 80–97.

The efficiency of the algorithms used in the two DMRL Doppler meteorological radars in recognizing hazardous weather phenomena is considered. The analysis of the distance and azimuth of the weather, the number of cases with precipitation and thunderstorms on the performance of their detection. The spatial distribution of the probability of “false alarms” and the omissions of thunderstorms of two DMRLs was constructed, the regions with maximums of probabilities were localized.

Keywords: weather hazards, Doppler meteorological radars, detection of hazardous weather phenomena.

Tab. 3. Fig. 9. Ref. 13.

The results of the introduction of new methods in the laboratories of the Rosgidromet atmosphere pollution monitoring network. Kovacheva E. V., Sharikova O. P., Gurevich I. G. Proceedings of MGO. 2019. V. 592. P. 98–112.

The results of the introduction of new methods in the laboratories of the Rosgidromet atmospheric monitoring network (APMN) are presented. To assess the quality of analysis of samples in the network laboratories of monitoring atmospheric air pollution (LAPMN) Rosgidromet after the introduction of new methods used an analysis of external control as an important factor in assessing the reliability of observations on the network (APMN). The analysis and comparison of the results of external control for the period from 2016 to 2018 (using new methods) with the results of external control for the period from 2009 to 2014 (according to old methods) on the network of Roshydromet (APMN) for a number of impurities (pollutants). The presented results indicate an increase in the quality of analysis of samples in the LAPMN of Roshydromet with the introduction of new methods.

Keywords: monitoring of air pollution, methods for measuring concentrations of pollutants in atmospheric air.

Tab. 3. Fig. 4. Ref. 19.

Fire hazard forecast for the European territory of Russia based on hydrodynamic forecast of meteorological field values. Ladolina E. M., Aniskina O. G. Proceedings of MGO. 2019. V. 592. P. 113–128.

The indices were considered and analyzed, on the basis of which it is possible to predict fire hazard under weather conditions. A fire risk prediction system based on the results of hydrodynamic modeling of atmospheric processes using the hydrodynamic mesoscale model WRF is described.

Keywords: fire hazard, fire risk prediction, hydrodynamic modeling.

Tab. 3. Fig. 2. Ref. 13.

The conditions of appearance and prediction of wind storm in the city of Orsk and Petropavlovsk at the territory of the South-Ural railway. Vykhodtseva E. A., Novikova N. A., Ivanova I. A., Drobzheva, Y. V. Proceedings of MGO. 2019. V. 592. P. 129–140.

The results of the analysis of wind speed forecasts in Orsk and Petropavlovsk obtained on the basis of N.A.Lebedeva method are presented. The results of the calculation of the criteria for the success of wind speed forecasting for the period from 2008 to 2017 for the Orsk and Petropavlovsk showed that the method of N.A.Lebedeva is effective for predicting storm values of wind speed.

Keywords: wind, method, forecast, success.

Tab. 4. Fig. 1. Ref. 10

Changes in snow cover characteristics in the south of ETR as a response to global warming. Ashabokov B. A., Tashilova A. A., Keshiva L. A. Proceedings of MGO. 2019. V. 592. P. 141–158.

According to the data of the snow cover (SC) characteristics of the cold seasons for the period 1961-2012 in the south of the European part of Russia (EPR) there are obvious statistics, anomalous values, rates of change in the characteristics of the joint venture since 1961 and since 1976 to 2012 (beginning of global warming). A certain statistical difference (T-test) of the average values of the studied meteorological parameters and the corresponding climatic norms. linear trends of snow cover characteristics are constructed. It was found that during the studied period there was a tendency of growth of the average decade height of the snow cover and a tendency to decrease the duration of the occurrence of snow cover.

Keywords: average decade snow height, seasonal air surface temperature, linear trend, correlation coefficient, explained dispersion..

Tab. 2. Fig. 8. Ref. 11.

The results of the analysis of the simultaneous variability of the parameters of cosmic and terrestrial weather. Stupishina O. M. Golovina E. G. Proceedings of MGO. 2019. V. 592. P. 159–171.

The issue of the presented work is the variations of atmosphere characteristics those are synchronous to the variations of space weather parameters. The enter data are daily statistics of environmental parameters each of them are standardized to their season medians. Some elements of folding epoch method and elements of cluster analysis are used in the work. The results allow supposing the connection between the baric imbalance generation in atmosphere of the Saint-Petersburg region and the solar activity phase.

Keywords: space weather parameters, solar activity, cluster analysis.

Tab. 4. Fig. 3. Ref. 9.

Electrical conductivity of air and meteorological visibility. Sterkhov P. L. Proceedings of MGO. 2019. V. 592. P. 172–180.

The monthly and average annual values of the specific total air conductivity at Voeikovo station and at Vostok station in Antarctica, obtained during the 34th and 36th Soviet Antarctic expeditions, are presented. The data for 1978-1996 are considered. The conductivity of air is compared with the meteorological visibility range and the interrelation of these quantities in the formation of annual and perennial variations is established.

Keywords: air conductivity, meteorological visibility range, monthly and annual values.

Fig. 6. Ref. 9.

Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 592

Подписано в печать 14.03.19. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 12,375. Тираж 300 экз. Заказ №6983.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ». 195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28Ц, оф. 1Н.