

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

588

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

Санкт-Петербург
2018

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

Редакционная коллегия

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

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

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

Рекомендуется аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

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

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

Editorial board

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей, М. Л. Торопова, А. А. Синькевич, А. Б. Куров, Н. Н. Волков, А. А. Игнатьев.</i> Особенности эволюции конвективных облаков и осадков в условиях сильного аэрозольного загрязнения атмосферы, вызванного лесными пожарами.....	7
<i>А. А. Шаповалов.</i> Численное моделирование электрических процессов в грозовых облаках.	28
<i>Р. Е. Торгунаков.</i> О возможности применения беспилотных летательных аппаратов для исследований напряженности электрических полей в атмосфере.	37
<i>Б. Г. Зайнетдинов.</i> Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе.	47
<i>М. А. Маддах, И. Н. Русин, А. М. Ахунд-Али.</i> Влияние пространственного разрешения на качество воспроизведения сильных осадков в модели WRF-ARW: пример — юго-запад Ирана.	62
<i>С. Ю. Гаврилова, Т. А. Иванова, Л. В. Луцько, А. Е. Ерохина, А. Н. Махоткин, Л. И. Коломеец, А. Ф. Садыкова.</i> О состоянии и функционировании автоматизированных метеорологической и актинометрической сетей в 2017 году.	86
<i>Е. В. Горбаренко, О. А. Шиловцева, И. В. Сошинская.</i> Режим естественной освещенности различно ориентированных вертикальных поверхностей по данным наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ.	110

<i>Л. В. Кашлева, М. Е. Баранова, Ю. П. Михайловский.</i> К расчету электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды». .	124
<i>М. В. Жарашуев, А. Х. Гергоков, А. Х. Кагермазов, В. С. Макитов, Л. Т. Созаева.</i> Метод повышения эффективности сопоставления радиолокационной и наземной информации.	139
<i>В. В. Ясюкевич, Н. В. Ясюкевич.</i> Появление чужеземных тропических видов комаров <i>Aedes</i> на юге России – оценка риска здоровью населения с учетом климатических и эпидемиологических факторов.	150
<i>Ю. П. Михайловский, Л. В. Кашлева, В. Н. Морозов.</i> Памяти И. М. Имянитова.	164
<i>К. Ш. Хайруллин.</i> Прорыв в стратосферу.	179

CONTENTS

<i>Dovgalyuk Yu. A., Veremey N. E., Toropova M. L., Sinkevich A. A., Kurov A. B., Volkov N. N., Ignatiev A. A.</i> Peculiarities of convective clouds and precipitation evolution during strong aerosol atmosphere pollution due to forest fires.	7
<i>Shapovalov V.A.</i> Numerical simulation of electrical processes in storm clouds.	28
<i>Torgunakov R. E.</i> On the possibility of application of unmanned aerial vehicles for the study of electric fields strength of the atmosphere.	37
<i>Zainetdinov B. G.</i> Results from observations of the atmospheric surface layer's electricity properties in the polar region.	47
<i>Maddah M. A., Rusin I. N., Akhoond-Ali A. M.</i> The effect of horizontal resolution on heavy rainfall simulation quality in the WRF-ARW model: Case study - southwest of Iran.	62
<i>Gavrilova S. Y., Ivanova T. A., Lutsko L.V., Erohina A. E., Makhotkin A. N., Kolomeets L.I., Sadikova A. F.</i> Automated meteorological and solar radiation networks state and functioning overview in 2017 year.	86
<i>Gorbarenko E. V., <u>Shilovtseva O. A.</u>, Soshinskaya I. V.</i> The natural illuminance mode of differently oriented vertical surfaces according to Moscow State University observations.	110
<i>Kashleva L. V., Baranova M. E., Mikhailovskii Yu .P.</i> On calculations of electrical parameters of troposphere in the conditions of «fair weather». ..	124

<i>Zharashuev M. V., Gergokov A. K., Kagermazov A. Kh., Makitov V. S., Sozaeva L. T.</i> Method of increasing the efficiency of the mapping radar and ground information.	139
<i>Yasjukevich V. V., Yasjukevich N. V.</i> The emergence of foreing tropical species of aedes mosquitoes in the South of Russia – assessment of health risk, taking into account climatic and epidemiological factors.	150
<i>Mikhailovskii Yu. P., Kashleva L.V., Morozov V. N.</i> In memory of I. M. Imyanitov.	164
<i>Khairullin K. Sh.</i> Breakthrough into the stratosphere.	179

**ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ
КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ
В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО АЭРОЗОЛЬНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ,
ВЫЗВАННОГО ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ**

*Довгалюк Ю. А.¹, Веремей Н. Е.¹, Торопова М. Л.¹,
Синькевич А. А.¹, Куров А. Б.¹, Волков Н. Н.¹, Игнатьев А. А.²*

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: veremey@gmail.com, dovgaluk35@mail.ru,
sinkevich51@mail.ru, marina-toropova@mail.ru,
remotesensing@mail.ru

² АО «Атомпроект»
191036 Санкт-Петербург, 2-я Советская ул., 9/2а
E-mail: ignat2000@gmail.com

Поступила в редакцию 27.01.2018
Поступила после доработки 22.04.2018

Важную роль в атмосферных процессах играют конвективные облака. Они осуществляют вертикальный перенос тепла, влаги, энергии и импульса, а также являются неотъемлемым звеном глобальной электрической цепи. С конвективными облаками связана значительная часть выпадающих осадков и опасные явления погоды (ливни, грозы, град, шквалы, смерчи), повторяемость и интенсивность которых в последние годы сильно возросла в результате антропогенного изменения климата. В связи с этим исследование конвективных облаков является важной и актуальной задачей.

Особый интерес представляет изучение эволюции конвективных облаков при аномально высоком содержании аэрозоля в атмосфере (природные и антропогенные пожары, пыльные бури, извержения вулканов, аварии на промышленных объектах и др.). Облачные

процессы в таких ситуациях могут существенно отличаться от тех, которые наблюдаются в обычных условиях. С одной стороны, аэрозоли ответственны за образование облаков и оказывают сложное и неоднозначное влияние на их эволюцию, в том числе на образование осадков. С другой стороны, облака и осадки также воздействуют на аэрозольный состав атмосферы, влияя на перенос аэрозолей, их физико-химическую трансформацию и очищение атмосферы за счет вымывания осадками аэрозольных частиц. Как ранее отмечалось в работах (Довгалюк и др., 2017а, 2017б), взаимодействие облаков и аэрозолей носит многофакторный характер, аэрозольные и облачные процессы связаны между собой многочисленными прямыми и обратными связями.

В настоящей работе рассматривается проблема взаимодействия облаков и осадков с дымовыми шлейфами, образовавшимися в атмосфере в результате лесных пожаров. Эта проблема является важной и актуальной, так как в последние годы с учетом непрерывно увеличивающегося антропогенного воздействия на природу лесные пожары сильно участились.

Авторами продолжены начатые ранее работы (Довгалюк и др., 2017 а) по численному моделированию эволюции конвективных облаков, загрязненных сажей и золой, которые выделяются при лесных пожарах. Моделирование опиралось на результаты лабораторных исследований, выполненных в ГГО (Куров и др., 2015).

В работе использовались две численные модели облачной конвекции: полуторамерная (Довгалюк и др., 2013) и трехмерная (Веремей и др., 2016). Обе модели доработаны и адаптированы к задаче исследования влияния аэрозолей, выделяющихся в атмосферу в результате лесных пожаров, на конвективные облака и связанные с ними осадки. В каждую модель был включен блок, описывающий влияние сажи и золы на облако. Лабораторные исследования, выполненные в ГГО (Куров и др., 2015), выявили льдообразующее действие указанных веществ, которое и было учтено в модели. Предполагается, что облачные капли в слое атмосферы с определенным диапазоном температур под действием аэрозолей полностью замерзают и переходят в ледяные кристаллы. В обычных

условиях (в незагрязненном облаке) замерзание капель происходит при более низких температурах, что подтверждено полученными в ходе выполнения проекта лабораторными экспериментами. Для сажки температура замерзания в среднем составляет -13 , для золы — -10 °С. Количество и пространственное распределение облачных ледяных кристаллов зависит от температуры замерзания. Эти кристаллы существенно влияют на эволюцию облака, а также на количество и фазовый состав осадков.

Численное моделирование с использованием обеих моделей выполнено для четырех случаев развития осадкообразующих конвективных облаков на фоне задымления атмосферы при лесных пожарах. Рассмотрены случаи, имевшие место в разных физико-географических регионах. Их краткое описание дано в таблице 1.

Для каждого случая проведено сравнение между собой результатов расчетов характеристик облака и осадков: для незагрязненной атмосферы и при ее загрязнении золой и сажкой в результате лесных пожаров. При этом предполагалось, что указанные вещества обладают льдообразующим свойством, что подтверждено лабораторными данными, полученными в ГГО. Это свойство проявляется у золы и сажки при разных температурах.

Выбранные регионы находятся в разных климатических условиях. Москва и Лучжоу отличаются умеренно-континентальным климатом и достаточно большим количеством осадков. Однако климат Лучжоу также может быть охарактеризован как субтропический, прослеживается влияние муссонов, ярко выражен осенний минимум осадков (в октябре). В Санкт-Петербурге климат является переходным от морского к континентальному, наблюдается большое количество осадков и более сглаженный сезонный ход осадков и температуры. Иркутск же отличается резко континентальным климатом, что выражается в больших сезонных амплитудах как температуры, так и сумм осадков.

Случаи 1 и 2 ранее были рассмотрены в статье (Довгалюк и др., 2017 а). Ниже мы приведем основные выводы из результатов расчетов.

Таблица 1

Краткое описание рассмотренных случаев

№ случая, дата, регион	Событие
1) 06.08.2010 г. Россия. Москва и Московская область.	В регионе летом 2010 г. наблюдалась жаркая и преимущественно сухая погода, которая привела к регулярному возникновению крупных лесных и торфяных пожаров (Плауде и др., 2013). Продукты горения вызвали сильное аэрозольное загрязнение атмосферы. Устойчивые антициклоны и ночные инверсии температуры способствовали накоплению аэрозолей в приземном воздухе. В указанный день сильное задымление атмосферы совпало с образованием и развитием мощных осадкообразующих конвективных облаков и выпадением ливневых осадков. По радиолокационным данным, высота верхней границы облаков достигала 11 км (Веремей и др., 2014).
2) 24.07.2016 г. Россия. Санкт- Петербург и Ленинградская область.	Накануне над регионом Сибири наблюдались интенсивные лесные пожары. Аэрозольные частицы переносились на расстояния, составляющие несколько тысяч километров. 22 июля аэрозольный шлейф достиг Ленинградской области. В период с 22 по 24 июля в регионе наблюдалась сильная мгла, которая 25 июля исчезла в результате смены направления ветра. На фоне сильного аэрозольного загрязнения атмосферы 24 июля во второй половине дня наблюдалось образование и развитие осадкообразующих конвективных грозовых облаков, давших осадки в виде ливней и града. Высота верхней границы облаков, по радиолокационным данным, достигала 13 км.
3) 07.05.2016 г. Россия. Иркутская область.	В указанный день произошел крупный пожар в Усольском районе Иркутской области, который был ликвидирован к вечеру. Пожар действовал на территории площадью 200 га, перейдя из нелесных земель в лесные. Согласно спутниковым данным, шлейф дыма от пожара растянулся в северо-западном направлении. В разные сроки наблюдалось развитие конвективных облаков разной мощности, от Cu hum до Cb, но в дневное время преобладали слаборазвитые облака, не дающие осадков.
4) 01.06.2016 г. Китай. Провинция Сычуань.	В районе гор. округа Лучжоу (провинция Сычуань) в указанный день наблюдались два очага пожаров площадью несколько кв. км (один — на СВ, другой — на В—ЮВ от Лучжоу). Наблюдалось развитие осадкообразующих кучево-дождевых облаков.

По расчетам с помощью трехмерной модели получено, что появление рассматриваемых аэрозольных частиц в атмосфере оказывает влияние на все основные характеристики облака и осадков. Однако характер этого влияния во многом зависит от конкретного состояния атмосферы.

В обоих случаях появление в облаке частиц сажи и золы приводит к увеличению массы облачных кристаллов, и эта масса охватывает большую часть облака. Дополнительное выделение фазового тепла приводит к росту скорости восходящего потока. Водность облачных капель в максимуме мало чувствительна к загрязнению.

Изменение максимумов содержания осадков в обоих случаях различно. Так, для случая Московской области максимальное значение водности дождевых капель уменьшается под действием аэрозоля (сажи — в 1,12, золы — в 1,24 раза). То же получено для ледности градин (для сажи — в 1,17, для золы — в 1,44 раза). Для случая же Ленинградской области максимальное значение водности дождевых капель изменяется незначительно, а ледность градин вообще не меняется.

Для обоих случаев наблюдается уменьшение максимальной интенсивности осадков при аэрозольном загрязнении облака. Для случая Московской области максимальная интенсивность дождя составляет: без загрязнения — 154,3, для сажи — 136,4, для золы — 123,0 мм/ч. Для случая Ленинградской области: без загрязнения — 194,4, для сажи — 187,5, для золы — 179,2 мм/ч. Еще более заметно изменяется максимальная интенсивность града. Для случая Московской области его интенсивность составляет: без загрязнения — 65,6, для сажи — 46,6, для золы — 28,5 мм/ч. Для случая Ленинградской области: без загрязнения — 172,8, для сажи — 163,4, для золы — 154,8 мм/ч. Уменьшение интенсивности осадков связано с тем, что облачные кристаллы, количество которых возрастает в результате льдообразующего действия аэрозоля, не коагулируют между собой и с облачными каплями. Это не способствует переходу облачных частиц в осадки.

Полуторамерная модель, напротив, дает увеличение осадков. Различие результатов связано с тем, что она усредняет все величины

по горизонтальным координатам и не учитывает взаимодействие облака с полем фонового ветра.

В данной статье рассмотрены случаи 3 и 4 (см. табл. 1). По аналогии со статьей (Довгалюк и др., 2017 а), для каждого варианта расчетов введено обозначение: А — без учета аэрозольного загрязнения; В — с учетом загрязнения атмосферы сажей; С — с учетом загрязнения атмосферы золой.

Перед этим обе модели были подвергнуты некоторой доработке. Анализ полученных ранее результатов показал, что в эволюции облака была несколько недооценена роль процессов, связанных с облачными ледяными кристаллами. В связи с этим в микрофизических блоках обеих моделей была скорректирована аппроксимирующая формула, описывающая интенсивность сублимации пара на льдообразующих ядрах и облачных ледяных кристаллах. Формула Кенига (Koenig, 1971) была использована без упрощений (ранее ряд коэффициентов был приравнен к нулю). Это позволило скорректировать расчет интенсивности двух процессов:

1) образования кристаллов и роста их массы вследствие сублимации пара (в том числе в результате перегонки пара с облачных капель на кристаллы);

2) перехода облачных кристаллов в градины вследствие сублимационного роста.

Помимо этого, был по-иному описан процесс перегонки водяного пара с облачных капель на кристаллы в случае, если упругость водяного пара больше насыщающего значения над плоской поверхностью льда, но меньше аналогичного значения для воды. Ранее данный процесс приближенно описывался путем непосредственного перехода влаги с капель на кристаллы, в пренебрежении промежуточной стадией перехода влаги в водяной пар. В новой версии модели данный процесс описан строго.

Учтено испарение облачных кристаллов, которым ранее пренебрегалось. Это позволило более точно описывать эволюцию кристаллической вершины (обычно — наковальни) облака, если оно развивается по вертикали до соответствующих высот.

1. Восточно-Сибирский регион РФ

При анализе данного случая использовались вертикальные профили температуры и влажности, полученные из данных радиозондирования по ст. Ангарск. Анализ указанных данных показал, что состояние атмосферы в указанный день было весьма устойчивым. Суммарный дефицит точки росы по уровням 850, 700 и 500 ГПа составлял 38 °С, что является признаком большой сухости воздуха. Таким образом, не следовало ожидать значительного вертикального развития конвективных облаков. В области значительных температурных контрастов подстилающей поверхности было возможно образование только слаборазвитых $Cu\ congestus$ — Cb .

Предварительный анализ состояния атмосферы был подтвержден данными расчетов (табл. 2). По полуторамерной модели (вариант 3А) получено образование и развитие мощно-кучевого облака, переходящего в кучево-дождевое, с верхней границей, достигающей 7,0 км. При этом нижняя граница колеблется в пределах 3,6—3,8 км, то есть вертикальная мощность облака невелика. Скорость восходящего потока, достигающая 15,7 м/с, быстро затухает. Значения водности и ледности всех фракций не достигают даже значения 1,0 г/м³. Осадки, выпадающие на подстилающую поверхность, также малы (дождь — 0,7, град — 0,2 мм/ч). Таким образом, модель воспроизвела случай развития достаточно слабой облачной конвекции.

Учет наличия сажи или золы (варианты 3В, 3С) привел к замораживанию облачных капель и исчерпанию их запаса. Заметного различия между вариантами 3В и 3С не наблюдалось, так как разница высот с температурами –13 и –10 °С при данном профиле температуры составила всего около 300 м. Поэтому далее варианты 3В и 3С разделять не будем. Образующиеся при замерзании капель облачные ледяные кристаллы быстро переходили в осадки вследствие сублимации водяного пара на их поверхности и коагуляции с дождевыми каплями. В связи с этим максимум ледности кристаллов не увеличился, а даже уменьшился (0,6 против 0,8 г/м³), в то время как максимальная водность дождевых капель возросла в 2,5 раза,

а ледность градин — в 1,8 раза (табл. 2). Основным механизмом образования дождевых капель являлось таяние градин в подоблачном слое. Сильно увеличилась интенсивность осадков: дождя — до 2,7 (против 0,7), града — до 1,9 (против 0,2) мм/ч.

Результаты расчетов по трехмерной модели дали аналогичные результаты (табл. 3, рис. 1) с той лишь разницей, что в незагрязненной атмосфере осадки не выпадали на подстилающую поверхность вообще, а ледяные частицы (как облачные кристаллы, так и градины) в облаке полностью отсутствовали. Присутствие аэрозолей в облаке и их льдообразующее действие привело к появлению некоторого количества осадков (как дождя, так и града). Здесь также варианты 3В и 3С оказались почти идентичными.

Таким образом, в данной ситуации мы имеем случай, когда облако при отсутствии аэрозольных примесей дает слабые осадки либо не дает их вовсе, а аэрозоли с их льдообразующим действием приводят к образованию ледяной фазы и, как следствие, к выпадению некоторого (хотя и незначительного) количества осадков. Этот результат получен как с помощью трехмерной модели, так и с помощью модели малой размерности.

Такие облака могут рассматриваться как ресурсные для активного воздействия кристаллизующим реагентом с целью искусственного усиления осадков.

2. Центральный Китай

Для данного случая использовались вертикальные профили температуры и влажности, полученные из данных радиозондирования по ст. Чунцин, максимально близко расположенной к месту описываемого явления. Атмосфера характеризуется чередованием слоев с устойчивой, безразличной и неустойчивой стратификацией. При достаточно сильном возмущении, инициализирующем конвекцию, а также при достижении восходящим потоком неустойчивого слоя между уровнями 5,5—7,0 км возможно развитие мощных осадкообразующих Св.

Таблица 2

**Максимальные значения основных характеристик облака и осадков,
высота и время их достижения (полуторамерная модель)**

Величина	Вариант 3А			Вариант 3В			Вариант 3С		
	max	z_{max} , км	t_{max} , мин	max	z_{max} , км	t_{max} , мин	max	z_{max} , км	t_{max} , мин
Высота верхней границы облака, км	7,0	—	21,0	7,2	—	22,0	7,2	—	22,0
Скорость восходящего потока, м/с	15,7	4,0	15,8	15,7	4,2	13,3	15,7	4,2	13,3
Водность облачных капель, г/м ³	0,8	5,6	17,0	0,1	4,2	12,9	0,1	4,2	12,9
Водность дождевых капель, г/м ³	0,1	0,8	29,6	0,3	0,4	28,1	0,3	0,4	28,1
Ледность градин, г/м ³	0,3	4,2	23,9	0,5	3,8	23,1	0,5	3,8	23,1
Ледность облачных кристаллов, г/м ³	0,8	5,8	17,9	0,6	5,8	17,7	0,6	5,8	17,7
Интенсивность дождя у подстилающей поверхности, мм/ч	0,7	—	31,0	2,7	—	29,0	2,7	—	29,0
Интенсивность града у подстилающей поверхности, мм/ч	0,2	—	29,0	1,9	—	28,0	1,9	—	28,0
Радиолокационная отражаемость, дБЗ	27,4	1,0	29,0	34,3	0,8	28,0	34,3	0,8	28,0

Таблица 3

**Максимальные значения основных характеристик облака и осадков,
высота и время их достижения (трехмерная модель)**

Величина	Вариант 3А			Вариант 3В			Вариант 3С		
	max	Z _{max} - км	t _{max} , мин	max	Z _{max} - км	t _{max} , мин	max	Z _{max} - км	t _{max} , мин
Высота верхней границы облака, км	4,9 (7,0)	—	46,7	4,9 (7,2)	—	40,2	4,9 (7,2)	—	40,0
Скорость восходящего потока, м/с	4,4 (15,7)	3,0	23,9	4,4 (15,7)	3,0	23,9	4,4 (15,7)	3,0	23,9
Водность облачных капель, г/м ³	0,7 (0,8)	4,3	31,2	0,2 (0,1)	3,4	27,8	<0,1 (0,1)	3,6	25,4
Водность дождевых капель, г/м ³	<0,1 (0,1)	3,5	35,2	0,1 (0,3)	0,6	34,8	0,2 (0,3)	0,6	34,8
Ледность градин, г/м ³	0,0 (0,3)	—	—	0,2 (0,5)	3,3	29,4	0,2 (0,5)	3,6	30,8
Ледность облачных кристаллов, г/м ³	0,0 (0,8)	—	—	0,3 (0,6)	3,6	33,0	0,3 (0,6)	3,6	32,9
Интенсивность дождя у подстилающей поверхности, мм/ч	0,0 (0,7)	—	—	1,7 (2,7)	—	36,6	1,7 (2,7)	—	36,2
Интенсивность града у подстилающей поверхности, мм/ч	0,0 (0,2)	—	—	0,1 (1,9)	—	36,1	0,1 (1,9)	—	36,6
Радиолокационная отражаемость, дБZ	9,7 (27,4)	3,8	37,1	28,7 (34,3)	0,6	34,8	28,7 (34,3)	0,6	34,8

Примечание. В скобках указаны результаты, полученные по полугоризонтальной модели.

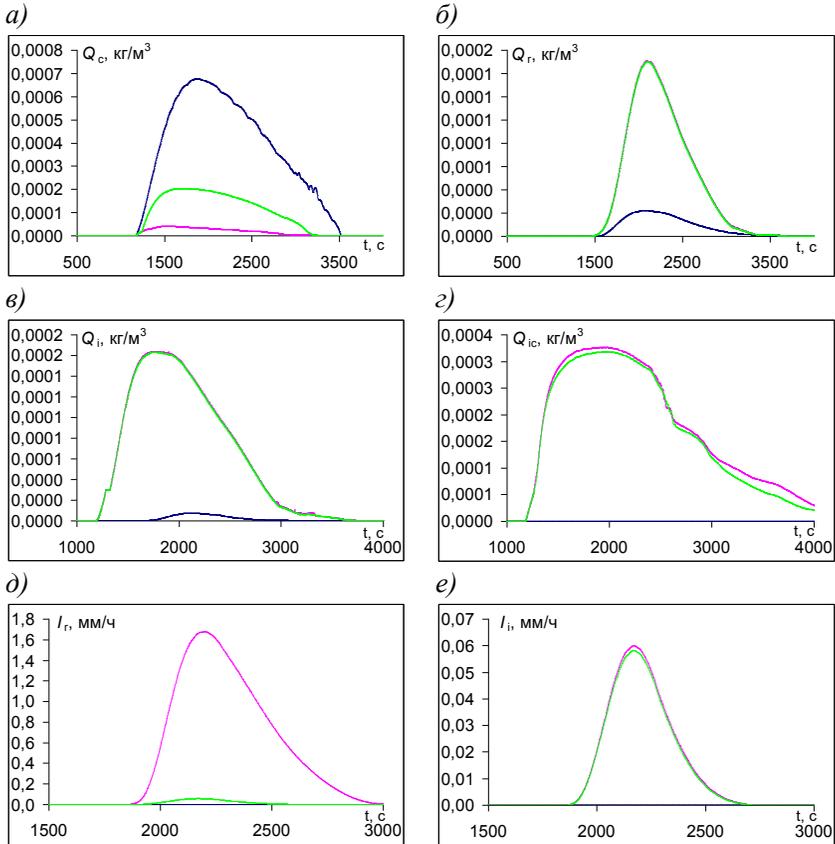


Рис. 1. Временной ход максимальных значений:

а) водности облачных капель; б) водности дождевых капель;

в) ледности градин; г) ледности облачных кристаллов;

д), е) интенсивности дождя и града соответственно
у подстилающей поверхности.

Синие кривые — вариант 3А, зеленые — 3В, красные — 3С.

Кривые отсутствуют при равенстве нулю соответствующих переменных.

В таблице 4 приведены результаты расчетов по полуторамерной модели. По аналогии с предыдущими случаями обозначим варианты расчетов 4А, 4В и 4С. Здесь мы видим качественно иную картину по сравнению с остальными случаями. Развивается осадкообразующее Сб с вертикальной мощностью 10,4 км, то есть упомянутый выше неустойчивый слой был достигнут. Град не образуется, а интенсивность дождя достаточно велика (25,6 мм/ч). Это связано с тем, что нулевая изотерма располагается весьма высоко (5,3 км), и град успевает полностью растаять по мере падения вниз. Но самой заметной особенностью является тот факт, что присутствие аэрозолей, выделяющихся при пожарах (как сажи, так и золы) оказывает крайне слабое влияние на эволюцию облака. Максимальные значения основных характеристик облака и осадков (скорость восходящего потока, водность, ледность, радиолокационная отражаемость, интенсивность осадков) изменяются под действием аэрозолей не более чем на 1—2 %. Это обусловлено тем, что уровни температуры воздуха -13 и -10 °С расположены весьма высоко (в невозмущенной атмосфере — 7,2 и 6,8 км соответственно). С учетом перегрева воздуха внутри облака по сравнению с окружающей средой эти уровни оказываются еще несколько выше. Все процессы, связанные с осадкообразованием, успевают, в основном, произойти до достижения этих уровней вершиной облака. Среди них значительную роль играет механизм образования теплого дождя (коагуляция дождевых капель с облачными).

Аналогичные результаты показывает и трехмерная модель (табл. 5, рис. 2—6). Ее отличие от полуторамерной состоит в том, что учет горизонтальной неоднородности позволил получить достаточно интенсивный град. Однако тот факт, что влияние аэрозольных частиц незначительно, выявлен и здесь. Вертикальные профили водности дождевых капель для вариантов 4А и 4С неотличимы друг от друга, а профиль ледности твердых осадков отличается лишь в верхней части (рис. 5), выше максимума и, тем более, выше подстилающей поверхности. Еще раз оговоримся, что экстремально высокая интенсивность осадков (свыше 100 мм/ч) наблюдается лишь в узкой области подстилающей поверхности.

Отметим, что в полуторамерной модели максимум ледности облачных ледяных кристаллов для вариантов 4В и 4С оказывается меньше, чем для 4А, несмотря на более интенсивное льдообразование. Это обусловлено тем, что кристаллы быстро расходуются на коагуляцию с дождевыми каплями. В трехмерной же модели вершина облака, где находится максимум ледности, частично разнесена по горизонтали со «стволом» облака, и в некоторых ее частях кристаллы сохраняются долгое время. В результате усиленная кристаллизация в случаях 4В и 4С (1,7 и 2,0 г/м³) по сравнению со случаем 4А (1,6 г/м³) наблюдается в явном виде (табл. 5).

Заключение

Выполнено численное моделирование конвективных облаков, развивавшихся на фоне аэрозольного загрязнения в результате лесных пожаров в разных регионах Земли при разных атмосферных условиях.

Показано, что влияние сажи и золы, попадающих в атмосферу при лесных пожарах, на эволюцию облаков и связанных с ними осадков существенно зависит от атмосферной ситуации, которая во многом определяется физико-географическими условиями.

Для некоторых случаев результаты, получаемые с помощью полуторамерной и трехмерной моделей, расходятся между собой — в основном, в части усиления или ослабления осадков. Это обусловлено тем, что ряд факторов эволюции облака (его взаимодействие с окружающей средой и с полем ветра), а также его несимметричность не могут быть описаны с помощью модели малой размерности, что сказывается на получаемых результатах.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 15-05-05719_а. Работы по трехмерному численному моделированию конвективных облаков выполнены с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М. В. Ломоносова (Воеводин и др., 2012).

Таблица 4

**Максимальные значения основных характеристик облака и осадков,
высота и время их достижения (полутораметровая модель)**

Величина	Вариант 4А			Вариант 4В			Вариант 4С		
	тах	Z _{тах} , км	t _{тах} , мин	тах	Z _{тах} , км	t _{тах} , мин	тах	Z _{тах} , км	t _{тах} , мин
Высота верхней границы облака, км	10,4	—	39,0	10,8	—	40,0	10,8	—	29,0
Скорость восходящего потока, м/с	21,8	4,4	11,6	21,1	4,4	11,6	21,2	7,6	19,1
Водность облачных капель, г/м ³	3,01	4,6	11,4	3,01	4,6	11,4	3,01	4,6	11,4
Водность дождевых капель, г/м ³	6,93	3,4	23,7	6,99	3,2	24,2	7,03	3,2	24,1
Ледность градин, г/м ³	6,15	5,6	19,1	6,16	5,6	19,1	6,33	5,6	19,2
Ледность облачных кристаллов, г/м ³	0,42	9,8	26,5	0,38	9,2	22,8	0,38	9,2	22,6
Интенсивность дождя у подстилающей поверхности, мм/ч	25,6	—	52,0	25,4	—	52,0	25,3	—	52,0
Интенсивность града у подстилающей поверхности, мм/ч	0,0	—	—	0,0	—	—	0,0	—	—
Радиолокационная отражаемость, дБЗ	57,8	3,4	23,7	57,9	3,4	23,7	57,9	3,4	23,7

Таблица 5

**Максимальные значения основных характеристик облака и осадков,
высота и время их достижения (трехмерная модель)**

Величина	Вариант 4А			Вариант 4В			Вариант 4С		
	max	Z _{max} , км	t _{max} , мин	max	Z _{max} , км	t _{max} , мин	max	Z _{max} , км	t _{max} , мин
Высота верхней границы облака, км	13,9 (10,4)	—	37,8	13,9 (10,8)	—	36,9	13,9 (10,8)	—	37,0
Скорость восходящего потока, м/с	33,0 (21,8)	4,5	20,0	33,0 (21,1)	9,2	27,2	33,6 (21,2)	9,3	27,2
Водность облачных капель, г/м ³	3,7 (3,01)	4,1	19,5	3,7 (3,01)	4,1	19,5	3,7 (3,01)	4,1	19,5
Водность дождевых капель, г/м ³	12,4 (6,93)	0,1	26,2	12,4 (6,99)	0,1	26,2	12,4 (7,03)	0,1	26,2
Ледность градин, г/м ³	11,1 (6,15)	5,1	22,8	11,1 (6,16)	5,1	22,8	11,1 (6,33)	5,1	22,8
Ледность облачных кристаллов, г/м ³	1,6 (0,42)	10,1	26,5	1,7 (0,38)	7,9	33,6	2,0 (0,38)	7,7	97,0
Интенсивность дождя у подстилающей поверхности, мм/ч	362,0 (25,6)	—	26,2	362,2 (25,4)	—	26,2	363,0 (25,3)	—	26,2
Интенсивность града у подстилающей поверхности, мм/ч	101,3 (0,0)	—	25,9	101,7 (0,0)	—	25,9	103,3 (0,0)	—	25,9
Радиолокационная отражаемость, дБZ	62,5 (57,8)	0,1	26,2	62,5 (57,9)	0,1	26,2	62,5 (57,9)	0,1	26,2

Примечание. В скобках указаны результаты, полученные по полуторомерной модели.

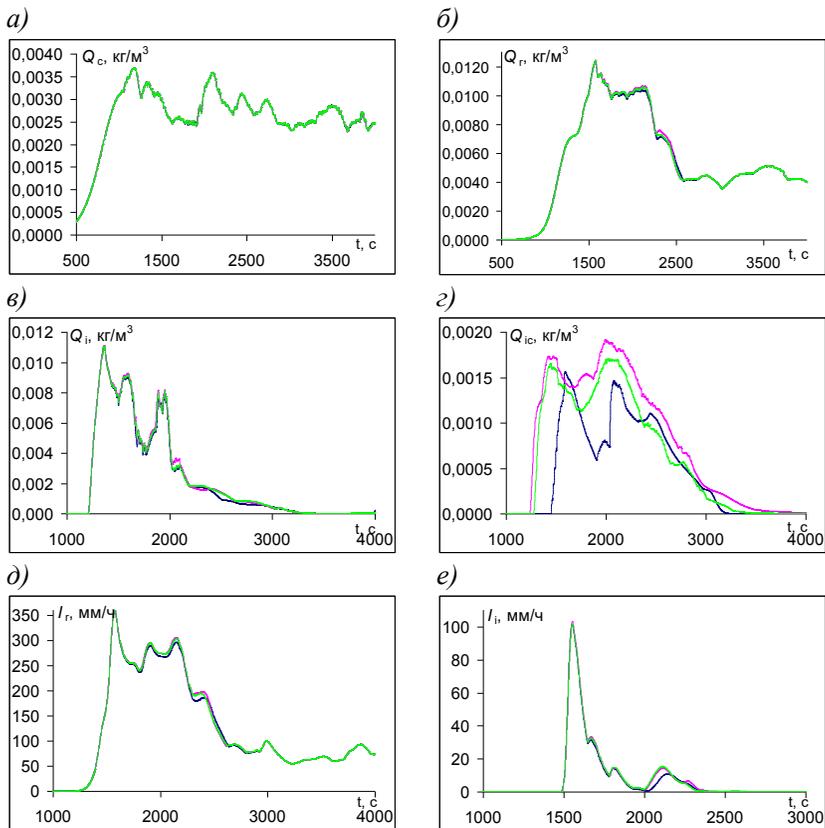


Рис. 2. Временной ход максимальных значений:
 а) водности облачных капель; б) водности дождевых капель;
 в) ледности градин; г) ледности облачных кристаллов;
 д), е) интенсивности дождя и града соответственно
 у подстилающей поверхности.
 Синие кривые — вариант 4А, зеленые — 4В, красные — 4С.

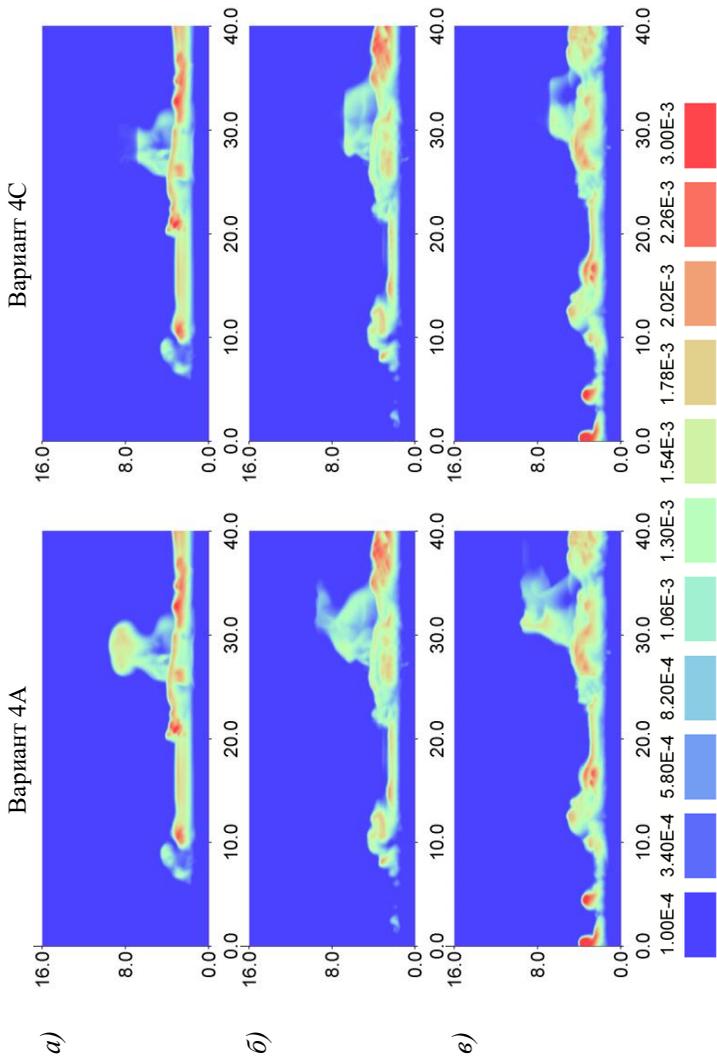


Рис. 3. Вертикальный профиль влажности облачных капель (г/м^3) в плоскости XZ (максимум по оси Y) для моментов времени: а) 1500 с; б) 1800 с; в) 2100 с.

Вариант 4А

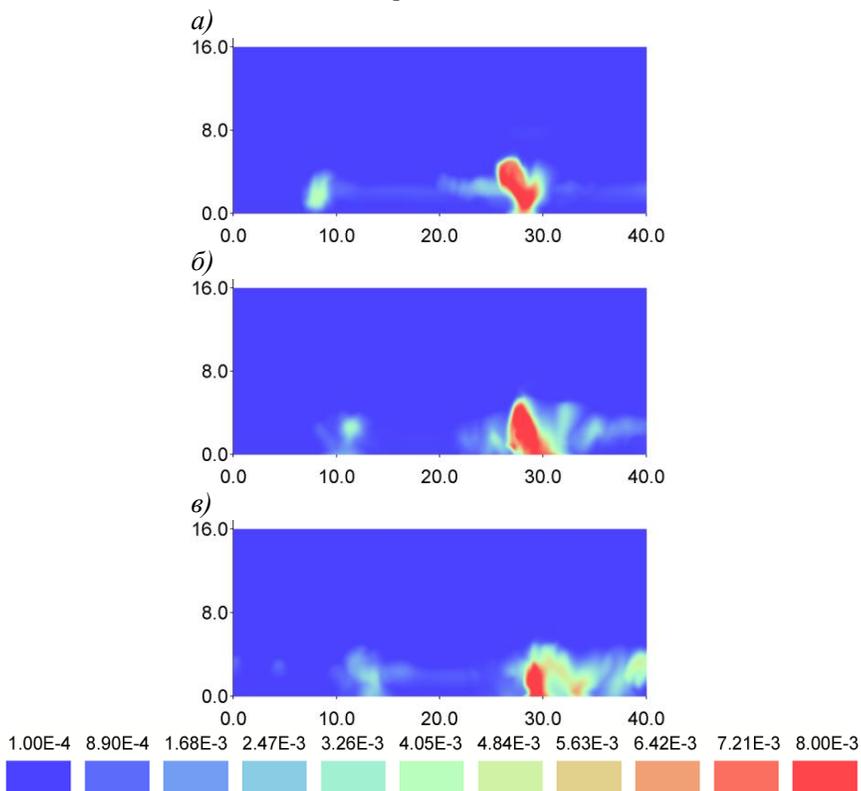


Рис. 4. Вертикальный профиль водности дождевых капель ($\text{г}/\text{м}^3$) в плоскости XZ (максимум по оси Y) для моментов времени: а) 1500 с; б) 1800 с; в) 2100 с.

Диаграммы для варианта 4С для данной величины выглядят неотличимо от случая 4А, поэтому здесь не приводятся.

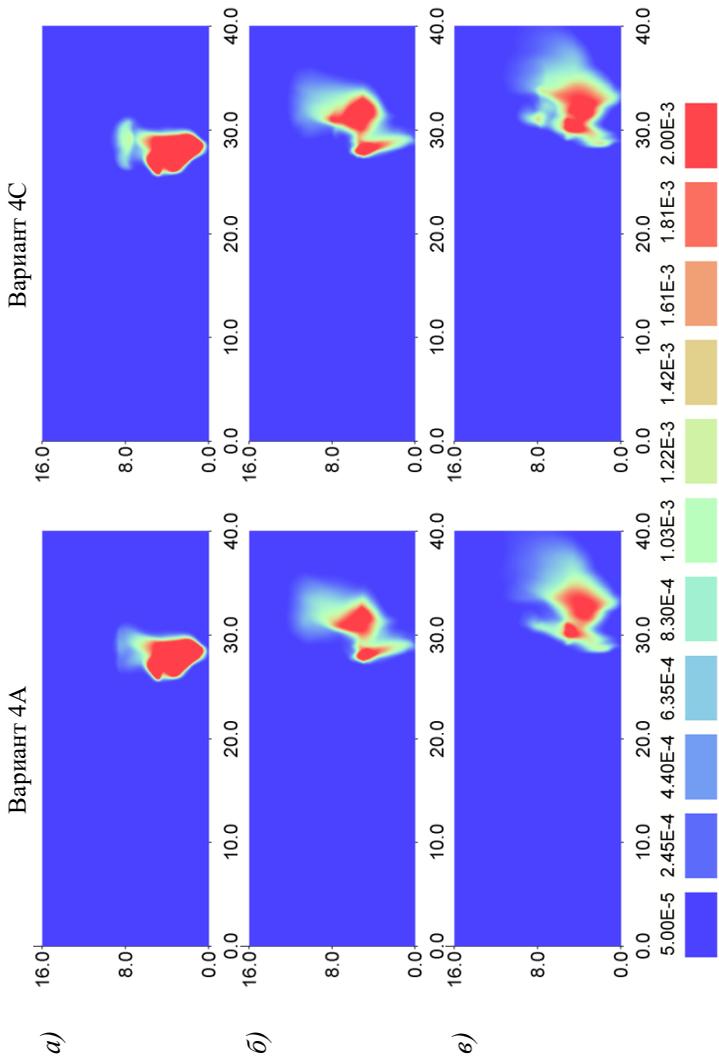


Рис. 5. Вертикальный профиль плотности градин (г/м^3) в плоскости XZ (максимум по оси Y) для моментов времени: а) 1500 с; б) 1800 с; в) 2100 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Дорофеев Е. В., Синькевич А. А., Комаровских К. Ф. (2014). Численное моделирование влияния сажевого аэрозоля на эволюцию конвективного облака при сильном аэрозольном загрязнении атмосферы // Труды ГГО. Вып. 572. С. 30—56.

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.

Воеводин Вл. В., Жуматий С. А., Соболев С. И., Антонов А. С., Брызгалов П. А., Никитенко Д. А., Стефанов К. С., Воеводин В. 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 полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. Второе издание. — СПб: Моби Дик. 220 с.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Торопова М. Л., Синькевич А. А., Куров А. Б., Волков Н. Н., Игнатъев А. А. (2017а). Влияние аэрозольного загрязнения атмосферы при лесных пожарах на эволюцию конвективных облаков и связанных с ними осадков // Труды ГГО. Вып. 585. С. 7—37.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Торопова М. Л., Куров А. Б., Волков Н. Н. (2017б). Влияние аэрозолей, образующихся при лесных пожарах, на эволюцию конвективных облаков и связанных с ними осадков (численное моделирование) / Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. — Нальчик. С. 58—65.

Куров А. Б., Веремей Н. Е., Волков Н. Н., Летенко Д. Г., Михайловский В. Ю., Синькевич А. А. (2015). Влияние сажевых частиц на кристаллизацию капель воды // Труды ГГО. Вып. 579. С. 205—213.

Плауде Н. О., Стулов Е. А., Парцуткина И. П., Сосникова Е. В., Монахова Н. А. (2013). Характеристики атмосферного аэрозоля в Московском регионе. — М.: Научный Мир. 79 с.

Koenig L. R. (1971). Numerical Modeling of Ice Deposition // J. Atm. Sci. V. 28. P. 226—237.

УДК 551.576.11+551.594.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ

В. А. Шаповалов

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

Поступила в редакцию 21.03.2018
Поступила после доработки 23.04.2018

Введение

Математическое моделирование играет в исследовании электричества облаков важную роль и позволяет всесторонне описывать происходящие в облаках электрические процессы.

В настоящее время в ГГО (Довгалюк и др., 2016; Веремей и др., 2016), в ВГИ (Ашабоков и др., 2013) и за рубежом (Rawlins, 1982; Altaratz et al., 2005) разработаны трехмерные модели конвективных облаков с учетом электрических процессов. В частности, в работе Довгалюк и др. (2016) приведена трехмерная модель конвективного облака, разработанная несколькими институтами Росгидромета под руководством ГГО. В этой модели динамика учитывается с помощью решения полной системы уравнений Навье—Стокса, микрофизика — на основе параметризаций. В ней также учтены следующие механизмы электризации: диффузионный; индукционный; сложение зарядов взаимодействующих частиц разных типов при их коагуляции; изменение количества заряда, переносимого частицами того или иного сорта, при их взаимных превращениях в процессе фазовых переходов; разделение заряда при упругом взаимодействии дождевых и облачных капель, поляризованных во внешнем электрическом поле; разделение заряда при упругом взаимодействии частиц (Веремей и др., 2016).

В работе (Altaratz et al., 2005) на базе модели RAMS исследовались особенности гроз на побережье Израиля, сопровождающихся

интенсивными осадками и мощной электрической активностью. Для этого в модель с параметризованной микрофизикой был встроено блок электрических процессов, учитывающий контактные механизмы электризации, формализованные по результатам лабораторных экспериментов Саундерса (Saunders, Peck, 1998) и Такахашии (Takahashi, 1978). Результатами численных экспериментов являлись объемные распределения зарядов в облаке, при этом получались как трехполосные структуры, так и диполи.

Трехмерная негидростатическая мезомасштабная модель (MesoNH) (Barthe et al., 2005) использует оригинальную микрофизическую схему смешанной фазы для параметризации процессов электризации в облаках. Электрические заряды переносятся каждой из пяти категорий гидрометеоров, а их перераспределение зависит от размера частиц. Электрическое поле моделируется на каждом временном шаге после интегрирования электрического потенциала, индуцированного объемным электрическим зарядом, по уравнению Пуассона.

Не останавливаясь подробно на преимуществах и недостатках существующих трехмерных моделей с учетом электрических процессов, отметим, что пока еще нет согласованного мнения по вопросу учета электризации и влияния электрических процессов на микрофизические. Полученные с помощью существующих моделей результаты следует рассматривать как начальный этап исследований.

В настоящей работе приведено описание расчета электрических параметров в разработанной в ВГИ трехмерной нестационарной математической модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов (Ашабоков и др., 2013). Приведены некоторые результаты расчетов потенциала и напряженности электрического поля в грозовом облаке на разных стадиях развития. Актуальность исследований объясняется тем, что трехмерных моделей конвективных облаков с учетом электрических процессов пока крайне мало, подходы к учету электрических процессов в них существенно различаются, поэтому необходимы анализ и сравнение с экспериментами результатов моделирования для оценки адекватности моделей. В дальнейшем исследования с применением таких моделей должны приобрести массовый характер.

Краткое описание модели

Гидротермодинамический блок модели, разработанной в ВГИ, состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска. Обоснование подхода приведено в работе (Коган и др., 1984).

Микрофизический блок описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками, а также взаимодействие облачных частиц под влиянием электрического поля облака. Используется система кинетических уравнений для функций распределения по массам капель $f_1(\vec{r}, m, t)$, ледяных частиц $f_2(\vec{r}, m, t)$ и осколков замерзания капель $f_3(\vec{r}, m, t)$ (Ашабаков и др., 2013).

В разработанной модели рассчитываются плотности объемных зарядов в облаке, потенциал и напряженность электрического поля, создаваемого этими зарядами, детально рассматривается влияние электрического поля облака на микрофизические процессы взаимодействия облачных частиц и обратное влияние — микроструктуры на электрические параметры.

За счет микрофизических процессов замерзания капель и аккреции в облаке идет накопление отрицательного заряда на ледяных частицах. Одновременно формируется положительный заряд, состоящий из зарядов отдельных частиц — осколков, образующихся при замерзании капель.

Для замерзающих капель, диаметр которых больше 200 мкм, с достаточной точностью процесс электризации описывается выражением (Аджиев, Тамазов, 1987):

$$q(m) = a \cdot m, \quad (1)$$

где m — масса замерзшей капли; a — коэффициент пропорциональности, значение которого меняется в зависимости от содержания примесей в капле и температуры ее замерзания ($a \approx 3,5 \cdot 10^{-10}$ Кл/г при $T = -8...-16^\circ\text{C}$).

На крупных кристаллах, крупе и градинах накапливается электрический заряд за счет захвата переохлажденных капель. Заряд

пропорционален массе замерзшей на них воды. При этом коэффициент пропорциональности зависит от температуры растущей частицы, а также от концентрации и химического состава примесей в облачной воде и принимает значение от 10^{-10} до 10^{-8} Кл/г.

Образование осколков при замерзании капель учитывается следующим образом (Ашабоков, Шаповалов, 2008):

$$\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_3 = \int_m^\infty n(m, m') R_{fr}(\vec{r}, m', t) f_1(\vec{r}, m', t) dm', \quad (2)$$

где $n(m, m')$ — число ледяных осколков массы m , образующихся при замерзании капель массы m' ; $R_{fr}(\vec{r}, m', t)$ — вероятность замерзания капель массой m' в единицу времени.

Образование осколков в процессе аккреции ледяных кристаллов с облачными каплями описывается формулой:

$$\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{AK} = \int_m^\infty n(m, m') R_{21}(\vec{r}, m', t) dm', \quad (3)$$

где $R_{21}(\vec{r}, m', t) = f_1(\vec{r}, m', t) \cdot \int_0^\infty \beta_2(m', \xi) f_2(\vec{r}, \xi, t) d\xi$ — число столкновений кристаллов массой ξ с каплями массой m' , приводящих к замерзанию последних и образованию осколков.

Число ледяных осколков $n(m, m')$ определяется согласно экспериментальным зависимостям выбросов микрочастиц от размера замерзающей капли.

Микроскопические осколки замерзания выносятся потоками в верхнюю часть облака, где образуется преимущественно положительный объемный заряд $\rho_+(\vec{r}, t)$. Область сосредоточения отрицательно заряженных ледяных частиц образует зону преимущественно отрицательного объемного заряда $\rho_-(\vec{r}, t)$.

Объемные заряды на временном шаге рассчитывались по формулам:

$$\rho_-(\vec{r}, t) = a_2 \int_0^{\infty} m f_2(\vec{r}, m, t) dm - \rho_2(\vec{r}),$$

$$\rho_+(\vec{r}, t) = a_3 \int_0^{\infty} m f_3(\vec{r}, m, t) dm - \rho_3(\vec{r}), \quad (4)$$

где a_2 и a_3 — коэффициенты разделения зарядов, $\rho_2(\vec{r})$ и $\rho_3(\vec{r})$ — уменьшение объемных зарядов в результате тока проводимости атмосферы и разрядов.

$$\rho_2(\vec{r}) = \lambda E(\vec{r}) + \gamma \sum_i \rho_-(\vec{r}, t_i),$$

$$\rho_3(\vec{r}) = \lambda E(\vec{r}) + \gamma \sum_i \rho_+(\vec{r}, t_i), \quad (5)$$

где λ — проводимость воздуха; t_i — моменты времени, в которые напряженность электрического поля превышает пробивное значение; γ — коэффициент сброса заряда при электрических разрядах.

Рассчитанные значения объемных зарядов ρ_3 используются для определения потенциала $U(\vec{r})$ создаваемого ими электрического поля. Для этого на каждом временном шаге решается уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho_3}{\epsilon_0} \quad (6)$$

при следующих граничных условиях

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0, L_x}, \quad \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0, L_y}, \quad \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \Big|_{z=0, L_z}, \quad U = 0 \Big|_{z=0} \quad (7)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума.

Напряженность электрического поля $E(\vec{r})$ в точке (\vec{r}) , обусловленного зарядами, расположенными в пространстве облака, определяется как градиент потенциала по формуле:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\left(n_x \frac{\partial U}{\partial x} + n_y \frac{\partial U}{\partial y} + n_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (8)$$

Значения напряженности электрического поля учитываются при определении коэффициентов коагуляции облачных частиц (Ашабоков, Шаповалов, 2008).

Результаты исследований

В мощных конвективных облаках, превышающих по высоте изотерму минус 22 °С, возникают объемные электрические заряды большой величины (до нескольких Кулон). Обычно верхняя часть облака заряжена положительно, средняя — отрицательно.

По результатам моделирования исследовано пространственное распределение положительного, отрицательного и суммарного объемных зарядов в облаке в различные моменты времени и напряженности электростатического поля.

Формирование электрических зарядов и поля в модельном облаке происходило вследствие замерзания капель и аккреции (взаимодействия капель и кристаллов). Вследствие разных скоростей падения в воздухе микроосколков (заряжающихся преимущественно положительно) и более крупных частиц, крупы и града (заряжающихся преимущественно отрицательно) происходит пространственное разделение зарядов: в предвершинной части облака скапливается положительный объемный заряд, в средней части облака — отрицательный. Плотность положительного и отрицательного объемных зарядов достигала $2 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-9}$ Кл/м³, (с учетом знака заряда).

С помощью разработанных алгоритмов рассчитывались вертикальная E_z и горизонтальные E_x , E_y составляющие напряженности электрического поля. По данным численного

появления конденсированной влаги) потенциал электрического поля составляет около $8 \cdot 10^8$ В. Компоненты напряженности поля имели значения $E_x \approx 1400$ В/см, а $E_z \approx 2000$ В/см (рис. 1). Наблюдаются двухполосные и трехполосные структуры. С течением времени объемный заряд в облаке и, соответственно, электрический потенциал возрастали.

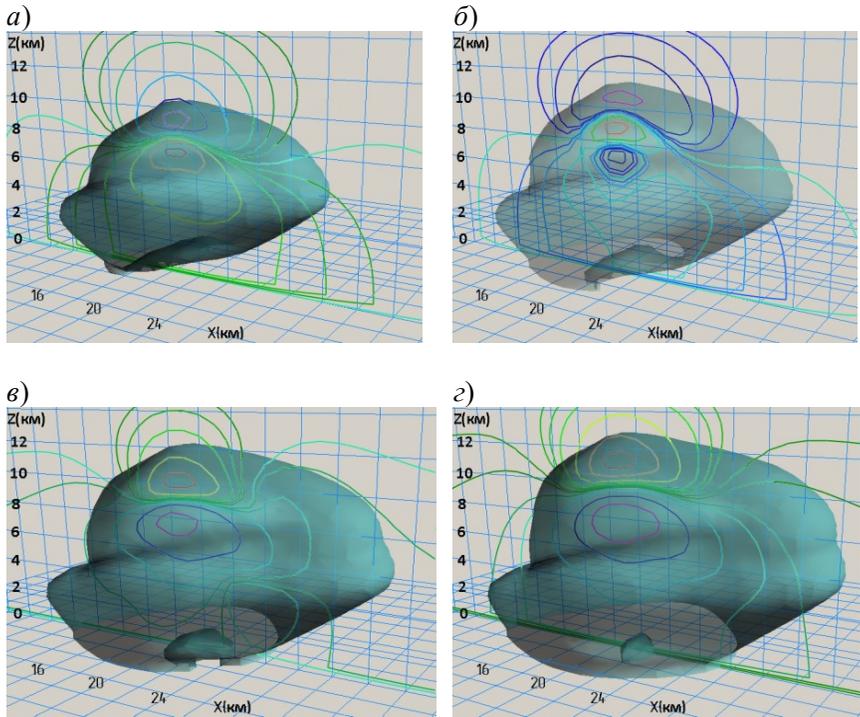


Рис. 1. Изолинии вертикальной составляющей напряженности электростатического поля в вертикальной плоскости, проходящей через облако, на фоне изоповерхности радиолокационной отражаемости $Z = 10$ дБZ в моменты времени:

а) $t = 30$ мин; б) $t = 33,5$ мин; в) $t = 37$ мин; г) $t = 40,5$ мин.

Значения изолиний (от центров вложенных контуров к периферии): $-2000, -1500, -1000, -500, -200, -100, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000$ В/см.

Максимальное значение потенциала на стадии зрелости облака составило около 900 МВ ($9 \cdot 10^8$ В). Результаты согласуются с расчетными данными других авторов, в частности, с приведенными в работах (Rawlins, 1982; Sinkevich et al., 2017).

При моделировании конвективных процессов одними из расчетных параметров являются радиолокационные отражаемости облачных частиц на длинах волн 3, 5 и 10 см. Наряду с другими параметрами проводился анализ радиолокационной отражаемости модельных облаков. При расчетах наблюдалась отражаемость до 60 dBZ и более, что соответствует наличию среднего размера града в облаке. Кроме того, эти параметры применялись для сравнения с отражаемостью реальных облаков, наблюдаемых с помощью метеорологических радиолокаторов МРЛ-5 и ДМРЛ-С, используемых на радиолокационной сети РФ.

Выводы

С применением математического моделирования исследованы новые важные аспекты механизма образования электрического заряда и поля в облаках с учетом взаимодействия термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Определены пространственное распределение и количественные значения объемных электрических зарядов и напряженности поля в облаке и вокруг него в последовательные моменты времени в процессе эволюции. Значения положительного и отрицательного объемных электрических зарядов достигают величин $\pm 10^{-9}$ Кл/м³, напряженности поля — до ± 1800 В/см и более, что согласуется с результатами измерений. Получено, что механизмы спонтанной кристаллизации крупных переохлажденных капель и роста градин за счет аккреции являются одними из ключевых физических процессов электризации на стадии роста и максимального развития грозоградовых облаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аджиев А. Х., Тамазов С. Т. (1987). Разделение электрических зарядов при кристаллизации капель воды // Метеорология и гидрология. № 7. С. 57—62.

Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В. (2008). Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. — Нальчик: Изд-во ИИПРУ РАН. 257 с.

Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В., Кулиев Д. Д., Продан К. А., Шаповалов В. А. (2013). Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития // Известия Вузов. Радиофизика. Т. 56. № 11—12. С. 900—907.

Веремей Н. Е., Довгальюк 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.

Довгальюк Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров С. А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Шаповалов А. В. (2016). Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных условиях и при активных воздействиях // Труды ГГО. Вып. 582. С. 7—44.

Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И. (1984). Численное моделирование облаков. — М.: Гидрометеоздат. 184 с.

Altaratz O., Reisen T., Levin Z. (2005). Simulation of electrification of winter thunderstorm using the three-dimensional Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) model: Single cloud simulation // J. Geophys. Res. V. 110. D20205. DOI: 10.1029/2004. JD 005616.

Barthe C., Molinie G., Pinty J. P. (2005). Description and first results of an explicit electrical scheme in a 3D cloud resolving model // Atmospheric Research. V. 76 (1—4). P. 95—113.

Rawlins F. (1982). A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase // Quart. Jour. of the Royal Met. Society. V. 108. P. 779—801.

Saunders C. P. R., Peck S. L. (1998). Laboratory Studies of the influence of the time accretion rate on charge transfer during crystal-graupel collisions // J. Geophys. Res. V. 103. № D12. P. 13949—13956.

Sinkevich A. A., Dovgalyuk Y. A., Veremei N. E. et al. (2017). Investigations of the development of thunderstorm with hail. Part 3. Numerical simulation of cloud evolution // Russian Meteorology and Hydrology. V. 42. Issue 8. P. 494—502. DOI: 10.3103/S1068373917080027.

Takahashi T. (1978). Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderclouds // J. Atmos. Sci. V. 35. № 6. P. 1536—1548.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Р. Е. Торгунаков

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
E-mail: roman.torgunakov@gmail.com

Поступила в редакцию 05.04.2018
Поступила после доработки 19.04.2018

Введение

Одним из основных недостатков исследований атмосферного электричества с использованием авиации является высокая стоимость создания и эксплуатации самолетов-лабораторий. Однако в последние годы огромными темпами развивается беспилотная авиация, которая в ближайшее время сможет заменить пилотируемую во многих отраслях хозяйственной деятельности, в том числе и при решении задач мониторинга состояния окружающей среды.

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для выполнения задач исследования физических свойств атмосферы обеспечивает следующие преимущества по сравнению с пилотируемой авиацией:

- 1) отсутствие ограничений, связанных с безопасностью пилотов, то есть возможность захода в грозовые облака;
- 2) экономическая выгода (меньшие закупочные цены и стоимость эксплуатации);
- 3) бóльшая продолжительность полета;
- 4) круглогодичное всепогодное применение;
- 5) лучшие экологические показатели.

Задачей данной работы является оценка возможности применения БПЛА для исследования атмосферного электричества в качестве носителя аппаратуры для измерения напряженности электрического поля и заряда летательного аппарата, на примере средневысотного БПЛА большой продолжительности полета (MALE, Medium Altitude Long Endurance) при помощи методики, предложенной авторами (Торгунаков и др., 2015). Были определены положения электрических нейтралей и выполнен расчет калибровочных коэффициентов для различных вариантов размещения датчиков на борту БПЛА.

Методика измерений

Методика измерения напряженности электрического поля и заряда летательного аппарата основана на использовании электростатических флюксометров, установленных на летательном аппарате и измеряющих различные компоненты электрического поля атмосферы (Торгунаков и др., 2017а, б). Для измерительной системы, состоящей из четырех датчиков, уравнение измерений можно записать в виде:

$$\mathbf{A} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{e}, \quad (1)$$

где \mathbf{a} — вектор выходных значений полезного сигнала флюксометров; \mathbf{e} — вектор значений внешнего электрического поля и заряда летательного аппарата; \mathbf{M} — калибровочная матрица размером $m \times 4$.

Решая уравнение (1) относительно \mathbf{e} , получим:

$$\mathbf{e} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{a},$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{a}, \quad (2)$$

где \mathbf{B} — матрица, обратная матрице \mathbf{M} .

Матрица \mathbf{M} показывает отношение выходного сигнала любого из

датчиков относительно внешнего электрического поля и собственного заряда летательного аппарата. С помощью матрицы **М** можно однозначно определить величину напряженности поля на выходе любого из датчиков и вектор **а**, зная значения компонент вектора **е**. Данное утверждение справедливо, если матрица **М** является совместной и определенной. При этом погрешности **е** определяются не только погрешностями измерения значений поля в местах расположения датчиков и погрешностями определения «коэффициентов формы» m_{ij} , но и конфигурацией самой матрицы, то есть местами расположения датчиков на фюзеляже. Этот фактор существенно увеличивает ценность разработанной методики, так как позволяет еще на стадии проектирования выбрать места оптимального расположения датчиков путем простого перебора возможных вариантов. Элементы матрицы **В**, в свою очередь, аналогично элементам матрицы **М** показывают взаимосвязь между векторами **е** и **а**.

Для определения калибровочных коэффициентов использовался метод компьютерного моделирования электростатического поля, окружающего самолет в полете. После получения значений напряженности электрического поля в местах предполагаемой установки датчиков осуществлялся расчет матриц калибровочных коэффициентов. Данная методика была апробирована при расчете измерений полей и заряда самолета с использованием самолета-лаборатории ГГО Ил-14 (Торгунаков и др., 2017а.б).

Моделирование электрических полей

БПЛА класса MALE имеют среднюю массу, длительную продолжительность полета и большую грузоподъемность. Максимальная высота полета на уровне 8000 м и большой радиус применения (150—250 км) позволяют данным БПЛА осуществлять продолжительные непрерывные измерения электрических характеристик атмосферы в широком диапазоне высот, в облачности различных типов на всех стадиях ее развития, в том числе и при неблагоприятных погодных условиях. Грузоподъемность БПЛА

составляет 200 кг. Это дает возможность использовать его как платформу не только для измерений напряженности электрического поля, но и как комплексную лабораторию по исследованию других физических и микрофизических свойств атмосферы и облаков. В настоящее время в авиации активно осуществляется замена металлических конструкционных материалов композитными. Применение композиционных материалов значительно снижает материалоемкость конструкций, уменьшает количество оснастки и резко снижает трудоемкость изготовления конструкций за счет уменьшения в несколько раз количества входящих в них деталей, позволяет значительно повысить тактико-технические и эксплуатационные характеристики самолетов. Планер современного БПЛА обычно целиком изготовлен из композитных материалов, таких как углепластик и стеклопластик. В общем случае углепластик не является идеальным диэлектриком и обладает удельной электропроводностью 10^3 — 10^4 См/м (для сравнения: удельная электропроводность алюминия составляет $3,8 \cdot 10^7$ См/м) (Abid, 2015). Однако методика измерений с помощью нескольких датчиков основывается на предположении, что поверхность тела является эквипотенциальной. Поэтому для применения композитного планера в качестве измерительной платформы его необходимо металлизировать, например, покрыв токопроводящей краской.

Моделирование электрического поля осуществлялось в программном пакете ANSYS Electromagnetics Suite при помощи электростатического решателя из состава ПО ANSYS Maxwell, основанного на методе конечных элементов, задача которого заключается в нахождении единственно возможного распределения электростатического поля в заданной расчетной области. Данный программный комплекс решает трехмерное дифференциальное уравнение Пуассона в частных производных для неизвестного электрического потенциала с заданными граничными условиями.

Моделируемый объект (самолет) задавался объемной моделью равномерно заряженного тела, изготовленного из углепластика с заданной анизотропной электропроводностью 2000 См/м

и диэлектрической проницаемостью 3,6. Модель самолета была изготовлена при помощи систем автоматизированного проектирования и программ трехмерного моделирования 3ds Max и SolidWorks. Граничные условия задавались электрическими потенциалами на границах модельной области.

Одним из решающих критериев при выборе оптимального расположения датчиков на борту летательного аппарата является положение электрических нейтралей самолета. Окружающее электрическое поле наводит на поверхности летательного аппарата заряд. Электрической нейтралью является линия на поверхности фюзеляжа, вдоль которой этот заряд равен нулю. Для определения положения электрических нейтралей модель самолета помещается в однородное внешнее поле, направленное вдоль одной из осей связанной с самолетом системы координат, и строится картина распределения наведенного полем заряда. На рис. 1 приведен результат моделирования искажений продольного электрического поля и распределения заряда по поверхности БПЛА.

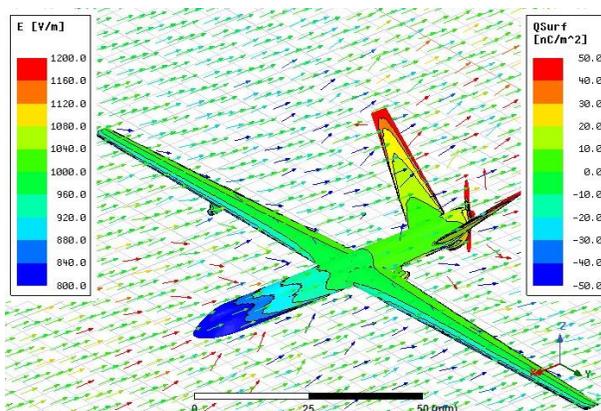


Рис. 1. Модель незаряженного БПЛА в продольном электрическом поле ($E_X = 1000 \text{ В/м}$). E — напряженность электрического поля, Q_{surf} — поверхностная плотность заряда.

Величина искажений электрического поля и распределение

поверхностного заряда для модели БПЛА принципиально не отличаются от таковых для исследованных ранее моделей пилотируемых самолетов (Торгунаков и др., 2017а, б).

Как и для других летательных аппаратов, в случае заряджения корпуса БПЛА во время полета поле непосредственно вблизи самолета может быть обусловлено не только внешним полем, но и собственным зарядом самолета или представлять собой их комбинацию. На рис. 2 представлена модель сильно заряженного БПЛА в слабом электрическом поле.

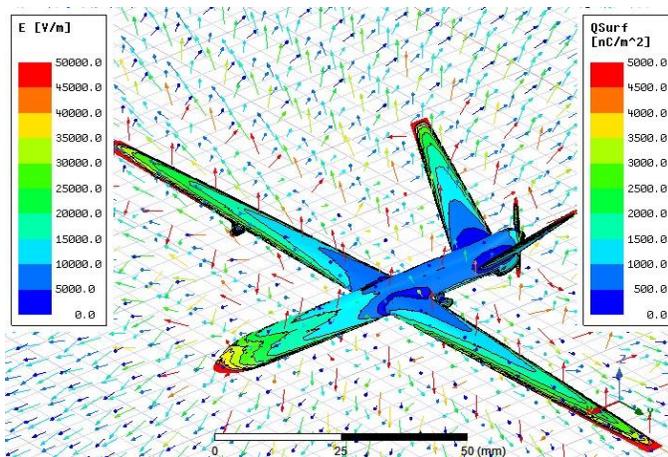


Рис. 2. Модель сильно заряженного БПЛА ($Q = 10^{-4}$ Кл) в слабом продольном электрическом поле ($E_x = 1000$ В/м).
E — напряженность электрического поля,
Qsurf — поверхностная плотность заряда.

Расположение электронейтралей БПЛА, полученное в результате моделирования электрического поля, направленного по всем трем осям, приведено на рис. 3.

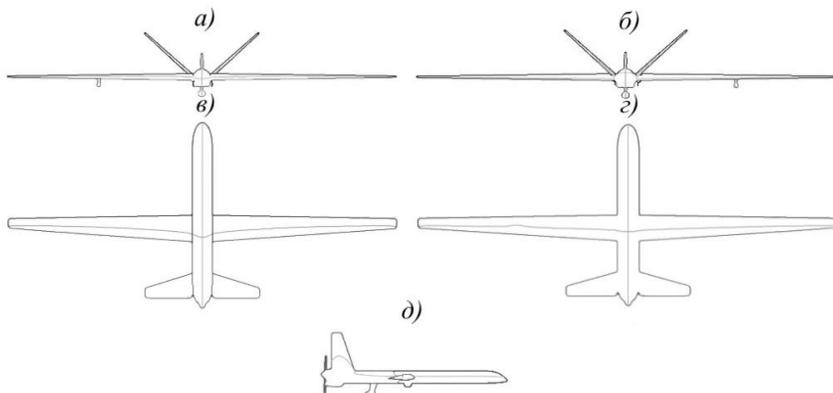


Рис. 3. Расположение электронейтралей на поверхности БПЛА:
 а) вид спереди; б) вид сзади; в) вид сверху; г) вид снизу; д) вид справа.

Расчет калибровочных коэффициентов БПЛА на основе данных компьютерного моделирования

Расчет калибровочных коэффициентов осуществлялся для различных вариантов компоновки датчиков на борту БПЛА (рис. 4). В связи с невозможностью размещения датчика, измеряющего продольную компоненту электрического поля, в носу или в хвосте рассматривался вариант монтажа датчика, направленного против полета, в обтекателе, установленном под правым крылом БПЛА. В первом варианте датчики располагались сверху и снизу в центральной части фюзеляжа, на левом борту и в обтекателе под правым крылом. Во втором варианте — сверху, в обтекателе под правым крылом, на левом борту и снизу в носовой части фюзеляжа. В третьем варианте — сверху фюзеляжа, снизу в центральной части фюзеляжа, на левом борту и в передней нижней части фюзеляжа. Матрицы калибровочных коэффициентов приведены в табл. 1.

Из полученных результатов видно, что датчик, установленный в обтекателе под крылом, из-за больших полей, наведенных собственным зарядом БПЛА, сильнее реагировал на вертикальную

и боковую составляющие поля, чем на продольную. Для сравнения вариантов расположения датчиков был произведен расчет обусловленности матриц. Хорошая (низкая) обусловленность матрицы показывает лучшую устойчивость решения к погрешностям в определении коэффициентов матрицы. Обусловленности матриц составили 943,01, 109,73 и 21,04 соответственно, что также говорит о том, что третий вариант компоновки, в котором датчик, установленный под крылом, не использовался, является наиболее удачным из всех рассмотренных.

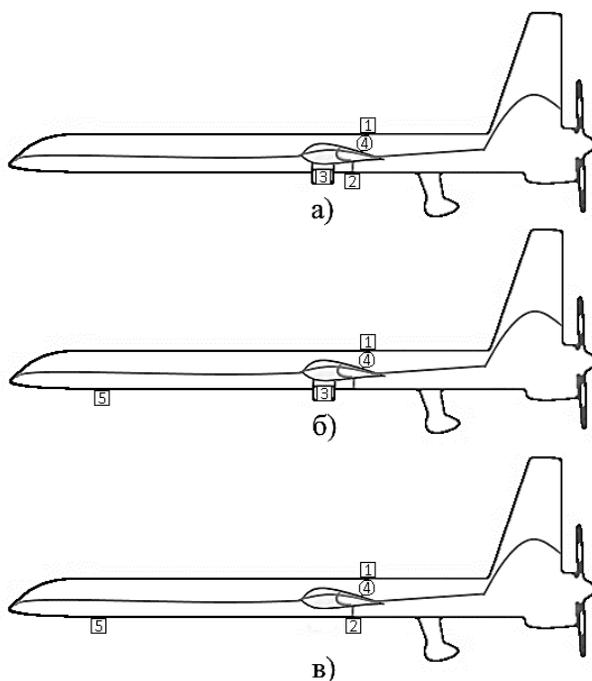


Рис. 4. Варианты расположения датчиков на самолете Ил-14.

Таблица 1

**Калибровочная матрица В для различных вариантов
расположения датчиков**

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
<i>Вариант а)</i>				
E _X	-88,488	-17,840	109,543	4,609
E _Y	3,026	0,235	-3,915	0
E _Z	-0,210	0,503	0	0
Q (Кл·10 ⁻⁹ /В·м)	-2,371	-2,159	0	0
<i>Вариант б)</i>				
E _X	-2,531	-0,281	3,476	0,146
E _Y	1,893	0,004	-2,517	0,059
E _Z	-2,631	0,008	2,988	0,126
Q (Кл·10 ⁻⁹ /В·м)	8,031	-0,034	-12,836	-0,540
<i>Вариант в)</i>				
E _X	0,286	0,585	0,000	-0,290
E _Y	3,026	0,235	-3,915	0
E _Z	-0,210	0,503	0	0
Q (Кл·10 ⁻⁹ /В·м)	-2,371	-2,159	0	0

Выводы

Выполнен анализ результатов моделирования искажений электрических полей фюзеляжем и собственным зарядом БПЛА и сравнение с результатами моделирования на моделях пилотируемых самолетов, используемых в качестве самолетов-лабораторий.

Выбрана оптимальная схема расположения датчиков, измеряющих напряженность электрического поля, на борту БПЛА. Осуществлен расчет калибровочных коэффициентов датчиков.

Изготовленные из современных композиционных материалов БПЛА могут использоваться как самолеты-лаборатории, в том числе и для измерения электрических полей в атмосфере при

соответствующей доработке, а именно при металлизации поверхности фюзеляжа для обеспечения его эквипотенциальности.

Используемая методика физико-математического моделирования электростатических полей позволяет производить расчет матриц калибровочных коэффициентов и может применяться при проектировании самолетных измерительных систем для БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Имянитов И. М. (1970). Электризация самолетов в облаках и осадках. — Л.: Гидрометеоиздат. 211 с.

Михайловский Ю. П. (2014). О технологии контроля напряженности электрического поля атмосферы и облаков с помощью самолетов-лабораторий // Методы и устройства передачи и обработки информации. № 16. С. 41—45.

Синькевич А. А. (1992). Создание комплекса самолетной метеорологической аппаратуры, разработка методики ее применения и результаты экспериментальных исследований облаков / Автореф. дисс. ... доктора техн. наук. — Л.: ГГО. С. 298—311.

Торгунаков Р. Е., Михайловский Ю. П., Синькевич А. А. (2015). О методике измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда летательного аппарата // Труды ГГО. Вып. 579. С. 214—231.

Торгунаков Р. Е., Михайловский Ю. П., Синькевич А. А. (2017а). Самолетные исследования напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках на ранней стадии развития // Труды ГГО. Вып. 587. С. 32—46.

Торгунаков Р. Е., Михайловский Ю. П., Синькевич А. А. (2017б). Совершенствование самолетной методики измерения напряженности электрического поля и заряда самолета для решения задач комплексных исследований облаков // В сб.: Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. — Нальчик: ВГИ. С. 205—212.

Abid R. (2015). Electrical Characterisation of Aerospace Grade Carbon-Fibre-Reinforced Polymers. PhD Thesis. — Cardiff School of Engineering, Cardiff. P. 19—24.

Koshak W. J. (2006). Retrieving Storm Electric Fields from Aircraft Field Mill Data. Part I: Theory // J. Atmos. Oceanic Technol. V. 23. P. 1289—1302.

Koshak W. J., Mach D. M., Christian H. J., Stewart M. F., Bateman M. G. (2006). Retrieving Storm Electric Fields from Aircraft Field Mill Data. Part II: Applications // J. Atmos. Oceanic Technol. V. 23. P. 1303—1322.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В ПОЛЯРНОМ РЕГИОНЕ

Б. Г. Зайнетдинов

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

Поступила в редакцию 5.02.2018
Поступила после доработки 2.04.2018

Введение

Начиная с 2013 года, в рамках программы развития геофизических сетей наблюдений на территории РФ проводилось переоснащение и расширение сети станций наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы (ЭХА). Для этой цели в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) был разработан атмосферно-электрический измерительный комплекс (АЭИК), включающий измерители напряженности электрического поля атмосферы «Поле-2М» и электрических проводимостей воздуха «Электропроводность-2М» (Зайнетдинов и др., 2015). Измерители метрологически обеспечены и занесены в Государственный реестр средств измерений.

Появление данного измерительного комплекса позволило дополнительно к четырем существующим станциям организовать еще 6 станций, четыре из которых расположены в высокоширотной зоне (см. рис. 1). Так в 2013 году наблюдения были начаты на ГМО Тикси, в 2014 и 2015 годах — на станциях Зашеек и Диксон соответственно. В конце 2017 года начаты измерения ЭХА на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» (НИС «ЛБ Мыс Баранова») на острове Большевик архипелага Северная

Земля. Постоянные наблюдения за ЭХА в полярном регионе организованы впервые.



Рис. 1. Карта расположения станций сети наблюдения за ЭХА.
Красной пунктирной линией обозначен северный полярный круг.

Наблюдения за ЭХА в высоких широтах интересны тем, что эффект от различного рода антропогенных и естественных воздействий на ионосферу, приводящих к изменению ее проводящих свойств и к изменению разности потенциалов в ионосфере, а, следовательно, и к изменению электрического поля и проводимости в приземном слое, сильнее проявляется по направлению силовых магнитных линий, которые сконцентрированы на полюсах.

Цель настоящего исследования — выявление естественных циклических колебаний и статистических закономерностей в вариациях электрических параметров атмосферы. В рамках данной работы:

— проанализированы данные напряженности электрического поля атмосферы (далее — E) и суммарной электрической проводимости воздуха ($L_s = L_+ + L_-$);

— определены суточные и годовые вариации анализируемых параметров в условиях «хорошей погоды»;

— получены распределения значений суммарной электрической проводимости воздуха L_s по направлениям ветра с целью выявления возможных локальных источников аэрозольного загрязнения, а также для качественной оценки распределения источников ионизации в окрестностях станций.

Выбор анализируемых станций

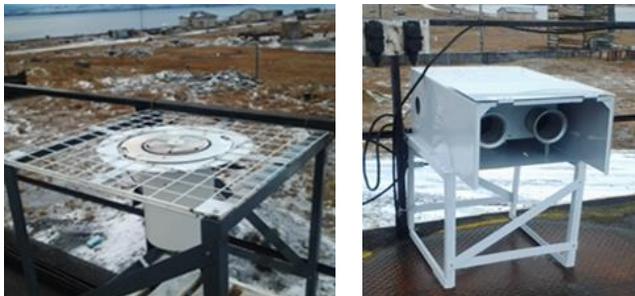
В настоящее время в полярном регионе функционируют четыре станции: ГМО Тикси, Зашеек, Диксон и НИС «ЛБ Мыс Баранова», выполняющие атмосферно-электрические наблюдения.

Станции ГМО Тикси, Диксон и НИС «ЛБ Мыс Баранова» схожи по географическому расположению и климатическим условиям: станции являются прибрежными, каждая из них находится на значительном удалении от промышленных районов. На этих станциях выносные блоки измерителей «Электропроводность-2М» и «Поле-2М», входящих в состав АЭИК, расположены на крышах модулей метеостанций на высоте 5—6 метров от уровня подстилающей поверхности (рис. 2). Это дает основание предполагать, что значения напряженности электрического поля на всех трех станциях будут схожи при прочих равных условиях.

Станция Зашеек в данной работе не рассматривается, поскольку на ней существенный вклад в естественные колебания измеряемых параметров вносит антропогенный фактор. Основным поводом, повлиявшим на выбор данной станции для установки приборов АЭИК, является Кольская АЭС, расположенная на расстоянии 7 км от станции. Станция расположена в относительной близости от районного центра на территории поселка с преимущественно печным отоплением, а, как известно, продукты сжигания значительно влияют как на напряженность электрического поля атмосферы, так и на электрическую проводимость воздуха. Помимо этого, дополнительный вклад в изменение ЭХА вносят утренняя конвекция и эманации радиоактивных газов.

Данные измерений в режиме реального времени передаются на сервер ГГО.

а)



б)



в)



Рис. 2. Установка выносных блоков измерителей «Поле-2М» и «Электропроводность-2М»: а) на ГМО Тикси; б) на НИС «ЛБ мыс Баранова»; в) на метеостанции Диксон.

Исследование статистических закономерностей распределения напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы

Согласно существующим представлениям, вариации параметров глобальной электрической цепи могут проявляться, в том числе, в изменении напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы, синхронном по всему земному шару. Как показывают измерения, проводимые в открытом океане (Чалмерс, 1974; Ваюшина и др., 1990) и на станции Восток в Антарктиде (Михайловский и др., 2012), суточный ход E имеет вид простой полуволны с максимумом в 19 часов по всемирному скоординированному времени (ВСВ) (так называемая унитарная вариация). Однако на материковых станциях выделить унитарную вариацию E достаточно сложно, так как здесь большое влияние оказывают локальные генераторы электрического поля, в первую очередь электрически заряженные частицы аэрозоля, а также локальные процессы ионизации атмосферы, связанные с выходом из почвы радиоактивных газов.

В этом плане перед началом проведения измерений предполагалось, что, в отличие от атмосферно-электрических станций умеренных широт, условия проведения измерений на высокоширотных станциях будут в меньшей степени определяться локальными факторами, то есть форма суточного хода E будет близка к унитарной вариации. Также значительное влияние на вариации E оказывают различного рода осадки, сопровождающиеся появлением в воздухе электрически заряженных частиц снега и льда, и метели (Попов, 2008; Герасименко и др., 2015).

Для иллюстрации этого на рис. 3 приведена ящичная диаграмма статистического распределения E при различных метеорологических явлениях по данным наблюдений на ГМО Тикси. Выборка построена по осредненным за минуту значениям E , период действия метеорологических явлений указывался с точностью до минуты. На диаграмме границам «ящичков» соответствуют 25-й и 75-й процентиля, линии внутри «ящичков» — 50-й процентиль.

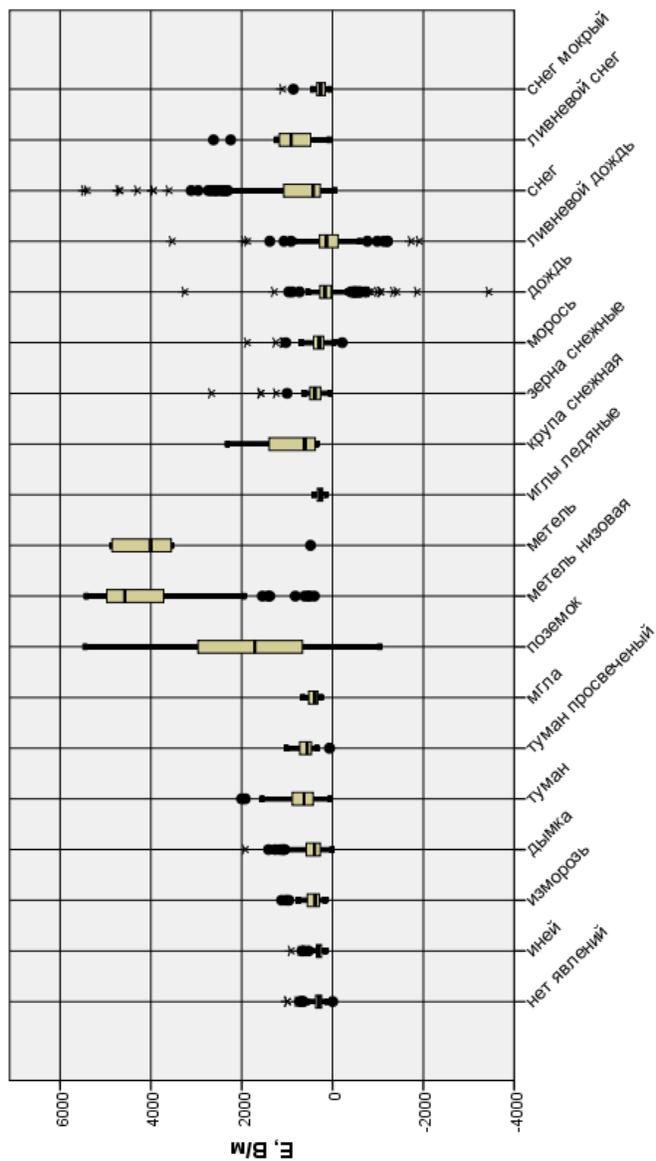


Рис. 3. Вариации E при различных метеорологических явлениях по данным измерений на ГМО Тикси в 2014—2015 гг.

Вертикальным линиям соответствуют 9-й и 91-й процентиля, границам точек – 2-й и 98-й, звездочки – выбросы.

На представленной диаграмме проявляется ряд статистических закономерностей воздействия частиц гидрометеоров на вариации E . При отсутствии метеорологических явлений значения E группируются вблизи 350—400 В/м, подобное распределение наблюдается при дымке, изморози, туманах и некоторых других явлениях. При наличии жидких осадков значения E в среднем ниже и могут достигать отрицательных значений, тогда как в твердых осадках они, наоборот, преимущественно превышают фоновую величину, которой являются значения во время отсутствия явлений.

При поземке и метелях средние значения E достигают 2000—4000 В/м, то есть в этих случаях поднимаемые в воздух частицы снега, имеющие преимущественно положительный электрический заряд, оказывают существенное влияние на результаты измерений E .

На рис. 4 приведена частота повторения значений E в теплый (с мая по сентябрь) и холодный (с октября по апрель) периоды года. Для оценки повторяемости значения E объединялись по интервалам шириной 10 В/м. Вертикальная шкала на графике построена в логарифмическом масштабе. Объем исходной выборки превышает 10^6 отсчетов для теплого периода и около $1,8 \times 10^6$ отсчетов для холодного.

Как следует из рисунка, в течение года максимальную повторяемость имеют значения E порядка 500 В/м. В холодный период средние 10-минутные значения E , превышающие 500 В/м, отмечаются примерно 30 % случаев, а E , превышающие 1000 В/м, — 17,5 % случаев, в теплый период для тех же значений E доля случаев составляет соответственно 12 % и 3 %. Отсюда можно сделать вывод, что периоды действия метелей и снегопадов на станциях Диксон и Тикси в холодный период года достаточно продолжительны, и интенсивность электрических возмущений атмосферы при этом столь высока, что это оказывает влияние на распределение статистических параметров E . Появление зимой локальных максимумов

повторяемости значений $E = -1000$ В/м и $E = -2000$ В/м пока не находит объяснения.

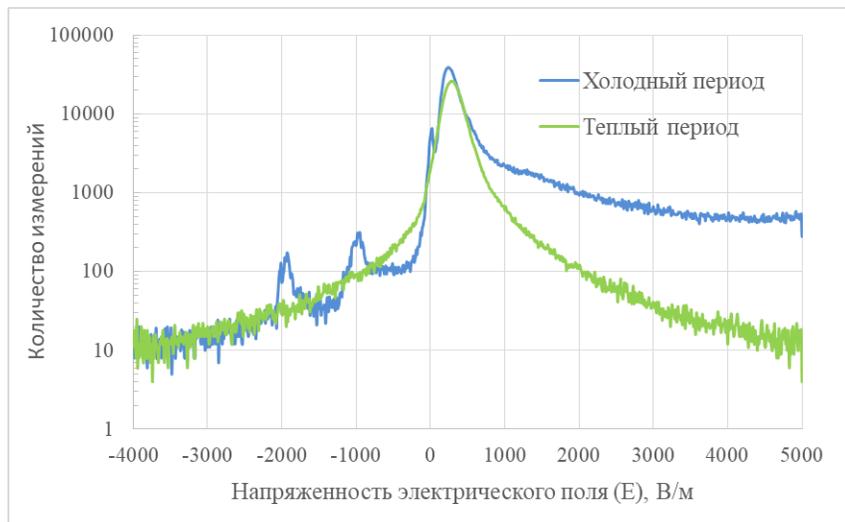


Рис. 4. Распределение средних минутных значений E в теплый и холодный периоды года на ГМО Тикси и на станции Диксон по данным измерений в 2014—2015 гг.

Как известно, условия «хорошей» погоды характеризуются полным либо пренебрежимо малым влиянием локальных факторов (таких как: скопление аэрозолей, источников сильной ионизации) на атмосферно-электрические параметры, а также отсутствием метеорологических явлений (осадков, дымок, туманов, и т.п.) и незначительной облачностью (до 4 баллов). Поэтому при построении среднего суточного хода E применялась автономная фильтрация данных. Программа, осуществляющая регистрацию, обработку и передачу данных АЭИК передает на сервер ГГО с периодичностью 1 мин информацию о напряженности электрического поля: среднее за минуту (E_{avg}), минимальное (E_{min}) и максимальное (E_{max}). Автономная фильтрация E для построения среднего суточного хода заключалась в выполнении условий:

$$E_{max} - E_{min} < 100,$$

$$150 \leq E_{avr} \leq 750$$

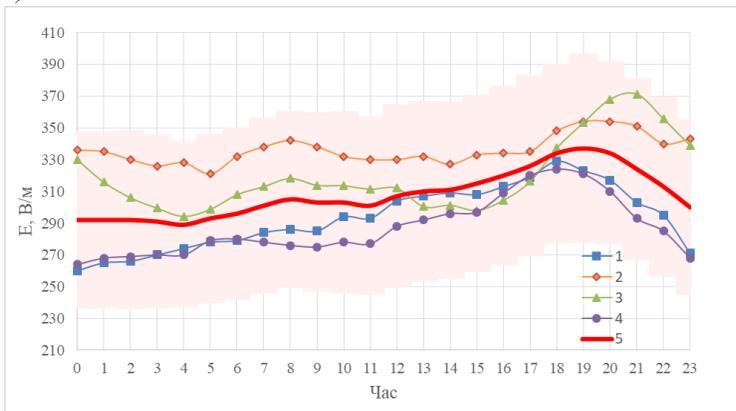
На рис. 5 представлены графики суточного хода E : среднего за год (розовой заливкой показано среднеквадратическое отклонение среднегодовых значений) и среднего для каждого календарного сезона для ГМО Тикси и станции Диксон.

Средний суточный ход в осенне-зимний период (с октября по март) на обеих станциях близок к унитарной вариации с максимумом в 19 ч ВСВ. В период с июля по сентябрь максимум E смещается на 21 ч, при этом в 8—9 ч наблюдается слабый вторичный максимум. Появление таких особенностей в весенне-летний период можно объяснить отсутствием снежного покрова и прогреванием верхних слоев грунта, что может приводить к появлению локальных источников ионизации, влияющих на изменение параметра E .

Также стоит отметить, что в теплые месяцы значения E , как правило, выше, чем в период с октября по март. Особенно четко эта закономерность проявляется на станции Тикси. Этот результат согласуется с распределением E , представленным на рис. 4 — в теплый период года мода распределения E равна 280 В/м, а в холодный — 240 В/м.

Отдельно был рассмотрен суточный ход в холодный период (с октября по март) по всем анализируемым станциям в сравнении с результатами, полученными в ходе экспедиции судна Карнеги и измерениями на Мод (рис. 6). Для удобства сравнения значения представлены в относительных единицах. На всех трех станциях суточный ход согласуется с представлениями об унитарной вариации. Наиболее четко унитарная вариация прослеживается на станции НИС «ЛБ мыс Баранова». Такое распределение, возможно, объясняется тем, что из всех представленных станций мыс Баранова является самой северной (78,6° с. ш.) и обособленной, поскольку находится на острове, а также наиболее удалена от промышленных районов.

а)



б)

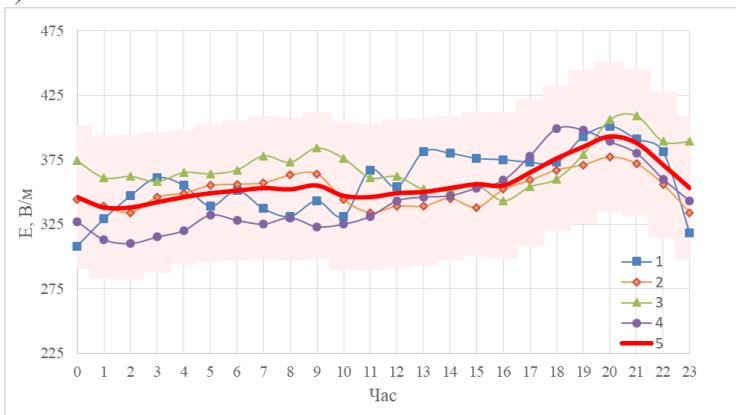


Рис. 5. Суточный ход напряженности электрического поля атмосферы на станциях Тикси (а) и Диксон (б) по сезонам и среднее за год. 1 — январь—март, 2 — апрель—июнь, 3 — июль—сентябрь, 4 — октябрь—декабрь, 5 — среднее за год.

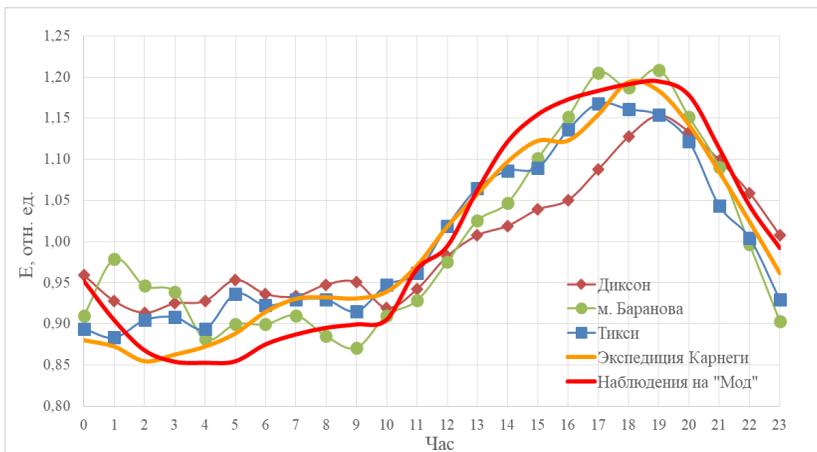


Рис. 6. Суточный ход напряженности электрического поля атмосферы на ГМО Тикси, станциях Диксон и м. Баранова с октября по март в сравнении с унитарной суточной вариацией, полученной во время экспедиции Карнеги и наблюдениях на Мод. Данные приведены в относительных единицах.

Исследование вариаций электрической проводимости воздуха в приземном слое атмосферы

Для выявления возможных локальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы на станциях Диксон и Тикси, а также для качественной оценки распределения источников ионизации в окрестностях станции выполнен анализ распределения значений удельной суммарной электрической проводимости воздуха L_s в зависимости от направления ветра. Обработка данных произведена на основании данных о ветре, полученных в синоптические 3-часовые сроки.

На рис. 7 и 8 для станций Тикси и Диксон приведены распределения L_s по направлениям ветра с шагом 45 градусов при различных скоростях ветра, наложенные на картографическую основу, для теплого и холодного периода.

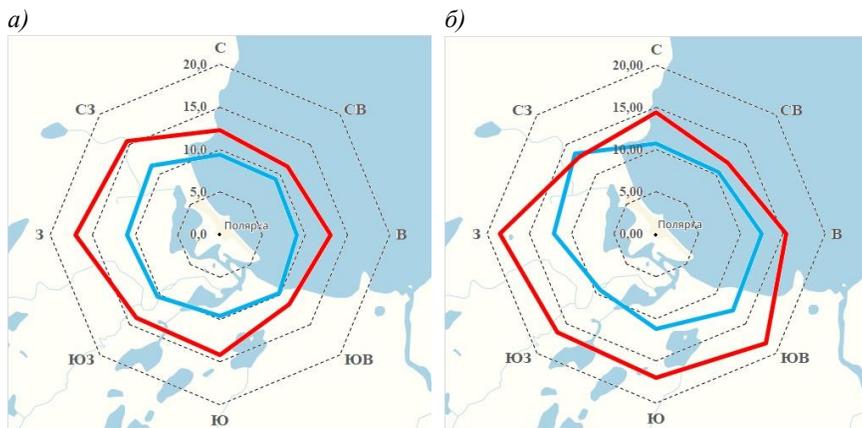


Рис. 7. Распределение значений суммарной электрической проводимости воздуха по направлениям ветра в теплый (красный) и холодный (голубой) периоды года на ГМО Тикси при скоростях ветра меньше 5 (а) и больше или равных 5 (б) м/с.

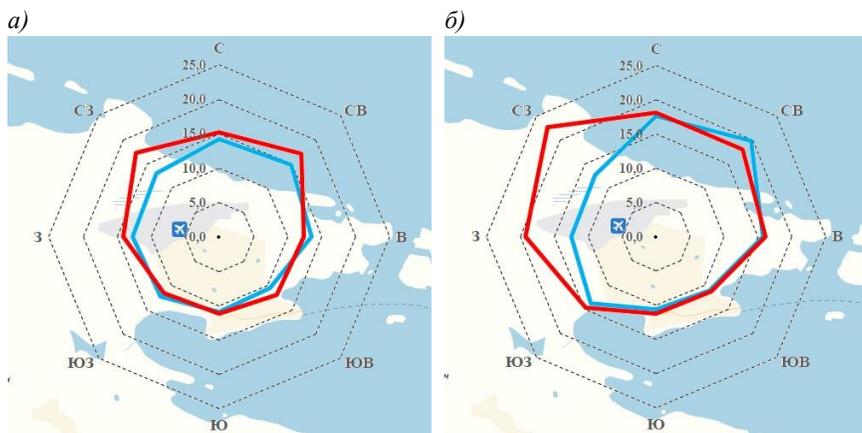


Рис. 8. Распределение значений суммарной электрической проводимости воздуха по направлениям ветра в теплый (красный) и холодный (голубой) периоды года на станции Диксон при скоростях ветра меньше 5 (а) и больше или равных 5 (б) м/с.

Более высокие значения L_s в теплый период объясняются наличием сезонного хода в результате повышенной интенсивности ионообразования за счет почвенных радиоактивных газов (Шварц, Соколенко, 2004; Попов, 2011). При малых скоростях ветра значения L_s как в теплый, так и в холодный период практически не зависят от направления ветра. При скорости ветра более 5 м/с начинают сказываться локальные источники, например, населенные пункты вблизи станции. Так в секторе с СЗ до ССЗ относительно станции Тикси (рис. 76) расположены поселок Тикси, военный городок Тикси-2 и аэродром.

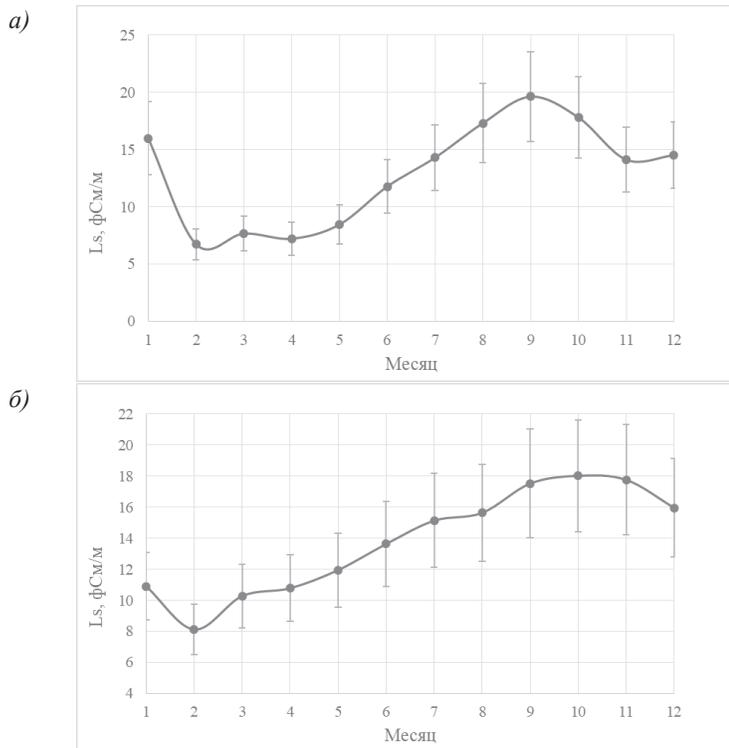


Рис. 9. Средний годовой ход L_s на ГМО Тикси (а) и станции Диксон (б). Вертикальными отрезками обозначено средноквадратическое отклонение.

В подтверждение гипотезы о влиянии почвенных радиоактивных газов служит представленный на рис. 9 средний годовой ход L_s . На обеих станциях для февраля характерны минимальные значения L_s , максимальные L_s наблюдаются в августе — ноябре. Амплитуда годового хода составляет на станциях ГМО Тикси и Диксон соответственно 14 и 10 фСм/м.

Средние L_s в теплый и холодный период различаются на 6 и 8 фСм/м, то есть по в грубой оценке получается, что вклад радиоактивности почв в суммарную величину электропроводности воздуха на анализируемых станциях составляет порядка 40 %.

Отметим, что анализ L_s на НИС «ЛБ мыс Баранова» не проводился в связи с недостаточным количеством данных.

Выводы

Приведены результаты измерений электрических параметров атмосферы в полярном регионе, полученные впервые на основе постоянных регулярных наблюдений.

На основании выполненных статистических исследований получены суточные и годовые (сезонные) вариации измеряемых параметров в условиях «хорошей погоды».

Суточный ход напряженности электрического поля соответствует современным представлениям о существовании унитарной вариации с максимумом около 19 ч ВСВ.

Выявлено, что основными факторами, определяющими изменение электропроводности воздуха на станции, являются сезонные вариации (годовой ход), направление и скорость ветра.

Полученные результаты будут полезны для дальнейших исследований, направленных на выявление факторов, оказывающих воздействие на электрическое состояние приземного слоя атмосферы, как естественного, так и антропогенного характера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ваюшина Г. П., Легашов И. М., Шварц Я. М. (1990) Наблюдения атмосферного электричества над океаном как часть общей системы регулярных атмосферно-электрических наблюдений / В сб. Вопросы атмосферного электричества – Л.: Гидрометеиздат. С. 158—167.

Герасименко Н. И., Зайнетдинов Б. Г., Морозов В. Н., Попов И. Б. (2015) Исследование вариаций напряженности электрического поля во время гроз с помощью методов вейвлет-анализа // Труды ГГО. Вып. 576. С. 81—91.

Зайнетдинов Б. Г., Попов И. Б., Соколенко Л. Г. (2015). О результатах модернизации атмосферно-электрической сети станций Росгидромета / Материалы Второй всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь». — Ярославль: С. 114—115.

Михайловский Ю. П., Попов И. Б., Стерхов П. Л. (2012). Измерения напряженности электрического поля и полярных электрических проводимостей воздуха на станции Восток (Антарктида) // Сборник трудов УИ Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. Том 2. — СПб: С. 33—34.

Попов И. Б. (2008). Статистические оценки влияния различных метеорологических факторов на градиент электрического поля атмосферы // Труды ГГО. Вып. 558. С. 152—161.

Попов И. Б. (2011). Особенности вариаций электрической проводимости воздуха вблизи Санкт-Петербурга // Труды ГГО. Вып. 563. С. 149—165.

Чалмерс Дж. А. (1974). Атмосферное электричество. — Л.: Гидрометеиздат. 424 с.

Шварц Я. М., Соколенко Л. Г. (2004) Результаты многолетних измерений градиента потенциала электрического поля атмосферы и удельных полярных электрических проводимостей воздуха в приземном слое на территории России / «Проектирование и технология электронных средств», спец. выпуск «Атмосферное электричество». С. 55—60.

**ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
НА КАЧЕСТВО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ
В МОДЕЛИ WRF-ARW:
ПРИМЕР — ЮГО-ЗАПАД ИРАНА**

*М. А. Маддах*¹, *И. Н. Русин*¹, *А. М. Ахунд-Али*²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт наук о Земле
199178 Санкт-Петербург, 10-я линия В. О., 33—35
E-mail: st046196@student.spbu.ru,
i.rusin@spbu.ru

² Shahid Chamran University of Ahwaz
Faculty of Water Science and Engineering
Ahwaz, Iran
Факультет водных наук и инженерии
E-mail: aliakh@scu.ac.ir

Поступила в редакцию 29.05.2017
Поступила после доработки 3.08.2017

Введение

Благодаря достижениям динамической метеорологии и быстрому развитию компьютерной техники сегодня для прогноза погоды широко применяются гидродинамические модели атмосферы. Важной проблемой при использовании этих моделей до сих пор является прогноз количества и места выпадения осадков. Прогноз осадков, как и оценка качества этого прогноза, особенно трудны из-за сильной неоднородности полей осадков во времени и пространстве. Предыдущие исследования показали, что на моделирование интенсивности и структуры сильных осадков влияют физические процессы, параметризуемые в численных моделях (Flesch, Reuter, 2012; Ghafarian et al., 2012; McFarquhar et al., 2006), взаимодействия

между этими физическими процессами, а также пространственное разрешение модели (Li, Pu, 2009; Davis, Bosart, 2002).

Можно было бы ожидать, что использование более высокого разрешения обеспечит более точное моделирование. Однако выяснилось, что это не всегда так. Pennelly et al. (2014) и Cassola et al. (2015) в своих исследованиях обнаружили, что более высокое пространственное разрешение позволило получить более точные результаты, но Roberts и Lean (2008) описали случаи, когда использование более мелкой сетки не повысило, а понизило точность моделирования. Schlüter и Schädler (2010) также не обнаружили улучшения в моделировании сильных осадков при уменьшении шага сетки с 7 до 2,8 км. Аналогичное наблюдение было сделано в работе (Маддах и др., 2017), где рассматривалось изменение точности прогноза осадков при увеличении пространственного разрешения модели (шаги сетки 5 и 1,7 км). Roberts et al. (2009) опубликовали такой же вывод, когда горизонтальный шаг сетки уменьшался с 4 до 1 км.

Также известно, что на прогноз интенсивности экстремальных осадков влияет параметризация конвекции (*ПК*) (Li et al., 1983; Li, Pu, 2009; Lin et al., 1983; Pennelly et al., 2014). Davis и Bosart (2002) утверждали, что прогноз интенсивности и следа тропического циклона Диана (1984 г.) с помощью модели WRF-ARW чувствителен к используемым схемам параметризации. В частности, использование схемы Каина—Фритша (Вельтищев, Жупанов, 2010) позволило предсказать интенсивность циклона Диана. Поскольку для точного прогноза интенсивности сильных осадков обычно стремятся использовать негидростатический вариант модели и высокое пространственное разрешение, то важно выяснить, действительно ли необходимо при этом наличие *ПК* или можно надеяться на то, что модель без *ПК* правильно опишет процесс образования сильных осадков.

Одной из самых популярных моделей, позволяющей дать независимый прогноз осадков, сегодня является модель WRF (Вельтищев, Жупанов, 2010).

Целью данной работы является анализ влияния повышения разрешающей способности модели WRF-ARW на точность прогноза осадков при наличии или отсутствии *ПК*. Данная работа выполнена после того, как была проведена адаптация модели для территории юго-западной части Ирана и подобран оптимальный для данной территории набор параметризаций физических процессов (Маддах и др., 2017).

Юго-западная часть Ирана окружена с севера и востока горными хребтами Загрос (высота горы Зард-Кух достигает 4548 м), где зимой регулярно выпадают интенсивные осадки, приводящие к очень опасным наводнениям. Количество осадков за один час может превысить среднемесячную сумму осадков для данного места, а за день может выпасть годовая норма осадков (I.R.I.M.O., 2008; Русин, Маддах, 2017). Повышение точности прогноза осадков для этой территории определяет актуальность и практическую значимость описанного в статье исследования.

Использованные ресурсы и методы верификации

Как уже упоминалось, для моделирования осадков была использована гидродинамическая мезомасштабная WRF-ARW, версия 3.6.1 (NCAR, 2014). На рис. 1 представлена конфигурация сеток модели, центр которых находится на юго-западе Ирана. Использовано три домена, обозначаемых в дальнейшем DO1, DO2 и DO3. Для изучения влияния пространственного разрешения на качество моделирования осадков были созданы четыре типа пространственного разрешения доменов, характеристики которых представлены в табл. 1. Для описания процессов используется равноугольная коническая проекция Ламберта в декартовой системе координат. Для всех доменов используется 35 уровней по вертикали в гибридной повторяющей рельеф системе координат с верхней границей на уровне 50 гПа. При моделировании использовались граничные условия двухстороннего взаимодействия.

В работе (Маддах и др., 2017) описана методика адаптации модели и выбора лучшей комбинации параметризаций модели WRF-ARW

к региону исследования со сложным рельефом — территории юго-запада Ирана. Согласно полученным результатам, лучшей является следующая комбинация параметризаций физических процессов: микрофизика облаков — схема Томпсона, длинноволновая радиация — схема RRTM, коротковолновая радиация — схема Dudhia, приземный слой описан по схеме Janjic—Eta—Monin—Obukhov, процессы на поверхности и в почве параметризованы при помощи унифицированной модели Noah, для параметризации пограничного слоя использована схема Меллора—Ямады—Янича, для конвекции — схема Каина—Фритша. Вышеуказанные параметризации и схемы детально описаны в работе (Вельтищев, Жупанов, 2010).

Хотя по публикациям хорошо известно, что все физические процессы важны в мезомасштабном гидродинамическом моделировании сильных осадков, существуют разные мнения относительно использования или не использования схемы для *ПК* в моделях с высоким разрешением. В частности, обычно не рекомендуется использовать *ПК* при численном моделировании с горизонтальным шагом сетки менее 5 км (Sun et al., 2013; Yu, Lee, 2010). Считается, что, когда горизонтальные шаги сетки достаточно малы, конвекция становится сеточным процессом и, следовательно, не нуждается в параметризации. Поэтому многие предыдущие исследования (например, Efsthathiou et al., 2013; Nasrollahi et al., 2012; Gsell et al., 2014) были выполнены без использования схем *ПК* в моделях с высоким разрешением (с шагом 3—4 км). Тем не менее, есть также недавние исследования, в которых использовались схемы *ПК* в моделях с горизонтальным разрешением 3,3 км (Cassola et al., 2015) и даже 3 км (Hernández-Ceballos et al., 2013). В статье Nasrollahi et al. (2012) показано, что использование схем *ПК* улучшает результаты моделирования, когда шаг сетки меньше 10 км. Li и Pu (2009) указали, что даже при небольших шагах сетки *ПК* полезна для описания конвективных систем и реалистического воссоздания структуры осадков. Однако они отметили, что присутствие *ПК* при 9-километровом шаге сетки улучшило результаты моделирования,

в то время как эффект использования такой параметризации при шаге 3 км оказал небольшое влияние на результат.

Поэтому в описываемых экспериментах для сравнения результатов моделирования, выполненного с различным разрешением, во всех модельных доменах конвекция была параметризована (табл. 1 «III+», «IV+», «V+» и «VI+»). Были проведены и контрольные эксперименты, когда в наименьшей модельной области (DO3) ПК не использована (см. табл. 1 «III-», «IV-», «V-» и «VI-»).

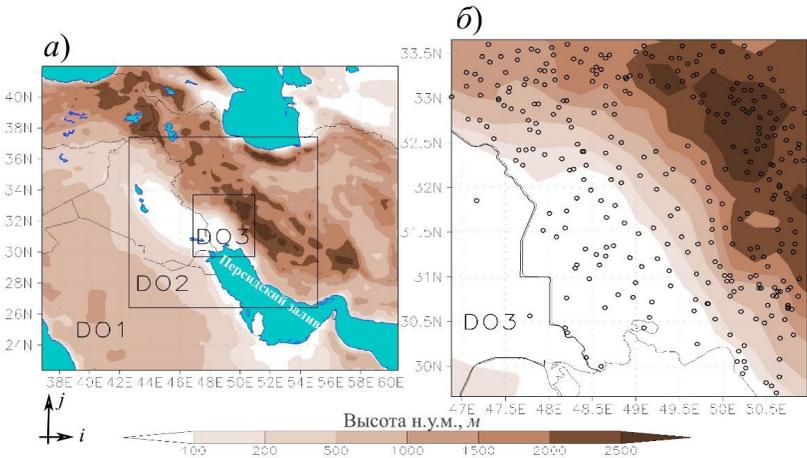


Рис. 1. Рельеф местности и конфигурация доменов модели WRF:
(а) внешний домен (DO1), вложенные (DO2 и DO3);
(б) домен DO3, в котором обозначены кружками станции, регистрирующие осадки.

В качестве начальных и граничных условий для каждого эксперимента были использованы данные FNL (<http://www.rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>) с пространственным разрешением 1° по долготе и широте и 27 изобарическими уровнями с дискретностью 6 часов (00, 06, 12, 18 ВСВ). Данные о топографии для доменов DO2 и DO1 взяты с шагом $2'$ (только в экспериментах «III-»

и «III+» DO2 имеет шаг 30"), для внутреннего домена DO3 — с шагом 30".

В данном исследовании были рассмотрены 10 случаев выпадения сильных атмосферных осадков (более 40 или 50 мм за сутки), которые вызвали локальные наводнения на юго-западе Ирана и нанесли значительный ущерб экономике региона. Всего проведено 80 численных экспериментов (10 случаев × 8 типов домена).

Таблица 1

Перечень экспериментов и их характеристики домена

Эксперимент	Шаг сетки по горизонтали, км			Количество узлов сетки ($i \times j$)			Размер, исследуемой территории, км × км		
	DO1	DO2	DO3	DO1	DO2	DO3	DO1	DO2	DO3
III–	27	9	3	67×67	121×130	147×168	1800 × 1800	1100 × 1100	440 × 380
III+									
IV–	36	12	4	50×51	94×100	115×133			
IV+									
V–	45	15	5	40×40	73×79	91×106			
V+									
VI–	54	18	6	34×34	61×67	76×91			
VI+									

Примечание: Знак «–/+» в наименовании экспериментов обозначает, что в эксперименте не используется (–) или используется (+) ПК в домене DO3.

Заблаговременность прогноза составляла 30 часов, начиная с 12 ч ВСВ. Первые 6 часов нужны для подавления шумов, связанных с переходом на сетку с меньшим шагом. Оценивались результаты 24-часового прогноза от 18 ч 00 мин предыдущего дня до 18 ч 00 мин ВСВ данных суток.

Для оценки результатов расчетов были использованы фактические данные о количестве осадков за сутки по 50 метеорологическим станциям, размещенные на сайте Иранской метеорологической организации: <http://www.irimo.ir/eng/wd/720-Products-Services.html>. Дополнительно к анализу привлекалась информация 250 осадкомерных станций, в том числе 18 климатологических. Таким образом, было задействовано приблизительно 300 станций, но в каждом конкретном случае их число менялось в зависимости от наличия и надежности данных наблюдений (см. табл. 2). Также были использованы 3-часовые данные TRMM 3B42 с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>) и спутниковые снимки (снимок в видимом диапазоне) Aqua/MODIS в 10:30 ВСВ для визуального анализа результатов (https://worldview.earthdata.nasa.gov/modis_aqua_correctedreflectance).

Таблица 2

**Список случаев, отобранных для оценки качества прогноза
максимального количества осадков**

№	Дата	Число надежных наблюдений	Максимальное количество осадков (мм/сутки)	Сильные осадки	
				Градация (мм/сутки)	Число станций, на которых наблюдалось количество осадков выше градации
1	13.12.2013	141	88	> 40	33
2	02.05.2013	119	123	> 40	12
3	21.12.2012	259	103	> 50	42
4	26.11.2012	194	98	> 40	35
5	26.02.2012	254	64	> 40	17
6	20.11.2011	208	131	> 50	38
7	27.01.2011	193	113	> 50	40
8	02.05.2010	256	67	> 50	17
9	28.11.2009	273	138	> 50	37
10	30.11.2008	193	102	> 50	58

Для оценки качества прогнозов использовались результаты моделирования в ближайших к станции узлах сетки. В домене DO3 из девяти узлов сетки, окружающих каждый пункт наблюдения за осадками, в качестве оценочного выбирался узел, в котором значения осадков были ближе всего к наблюдавшемуся значению. Такая процедура оценки, предложенная в работе (Giannaros et al., 2015) и результативно примененная Маддахом и др. (2017), позволяет избежать недооценки качества прогноза модели за счет небольшого смещения точки выпадения осадков, вызванного дискретностью сетки. Как и в ранней работе (Маддах и др., 2017), для верификации прогнозов использованы два вида анализа: количественный и качественный, основанный на построении матриц сопряженности.

Количественный анализ выполнялся на основе расчета общепринятых статистических критериев, а именно: относительная (RE) и средняя абсолютная (MAE), систематическая (ME) и квадратическая (RMSE) ошибки прогнозов, коэффициенты корреляции Пирсона (CORR) между прогностическими и фактическими полями метеорологических величин (Исаев и др., 2015; Moazami et al., 2014).

Значения относительной и систематической ошибок позволяют оценить качество моделирования с точки зрения завышения или занижения количества осадков в точке, а среднеквадратическая и средняя абсолютная ошибки дают информацию о качестве прогноза по всей исследуемой области. Коэффициент корреляции позволяет оценить пространственное соответствие фактических и модельных осадков и менее чувствителен к количеству осадков.

Матрица сопряженности учитывает все возможные комбинации прогнозируемых и фактических событий выпадения осадков. Пусть А означает, что событие предсказано и произошло; С — событие произошло, но предсказано не было; В — событие предсказано, но не произошло; D — правильно предсказано, что событие не произойдет.

По матрице сопряженности были рассчитаны следующие индексы:
— $BIAS = (A + B) / (A + C)$ — отношение между количеством прогнозируемых событий и количеством наблюдаемых событий. Этот индекс демонстрирует завышение ($BIAS > 1$) или занижение

($BIAS < 1$) моделью количества наблюдаемых событий. $BIAS = 1$ означает совпадение числа прогнозируемых и наблюдаемых случаев осадков. $BIAS$ не является мерой точности и не обязательно $BIAS = 1$ соответствует идеальному прогнозу.

— $FAR = B / (A + B)$ — это доля прогнозируемых событий, которые были предсказаны, но не наблюдались (ложная тревога). Лучший результат соответствует $FAR = 0$, а наихудший при $FAR = 1$. $FAR = 0$ не обязательно соответствует совершенным прогнозам.

— $POD = A / (A + C)$ — это доля станций, на которых правильно смоделированы осадки. Лучший результат соответствует $POD = 1$, а наихудший при $POD = 0$. $POD = 1$ означает идеальный прогноз.

— $GSS = (A - E) / (A + B + C - E)$ — оценка GSS включает коррекцию воздействия ложных осадков — $E = (A + B) \times (A + C) / N$. Значения GSS колеблются от $-1/3$ до 1. При $GSS = 0$ результат моделирования осадков считается случайным, положительные значения GSS указывают на уровень точности прогноза, а идеальным прогноз осадков считается, когда $GSS = 1$ (Schaefer, 1990).

Результаты и обсуждения

В рамках данного исследования статистические индексы $BIAS$, FAR , POD и GSS рассчитывались для событий типа «количество осадков больше (меньше) порогового значения». В качестве пороговых выбраны значения 1 — градация было / не было, 5 — слабые, 15 — средние и 40 мм/сутки — очень сильные осадки. Оценки ME , RE , MAE , $RMSE$ и $CORR$ были рассчитаны для четырех градаций: слабые осадки — 0—5, средние — 5—15, сильные 15—40 и очень сильные — более 40 мм/сут. После проведения расчетов на основе анализа оценок ошибок удалось определить эксперимент, дающий лучшие оценки прогноза осадков.

Сначала проводился предварительный качественный визуальный анализ результатов моделирования осадков — анализировалось пространственное распределение модельных и фактических осадков, которые определялись по TRMM и данным наблюдений.

Для примера на рисунке 2 показано фактическое (*а, б и в*) и модельное (*г, д, е*) поля суточного количества осадков на юго-западе Ирана для случая «№ 6» в эксперименте «IV–» (см. табл. 1). Видно, что при всех разрешениях модель правильно воспроизводит пространственное распределение осадков. При всех разрешениях сетки максимальное количество осадков прогнозируется над внутренними горными районами, значит, доминирующим является процесс орографического усиления, особенно на сетке, где конвекция описывается сеточным процессом (рис. 4 *е*). В данных наблюдений такого усиления мы не видим, что может быть связано с отсутствием и неточностью измерений в высокогорных районах. Для анализа во всех полях рис. 2 выделен квадрат, который соответствует области максимального количества осадков по данным наблюдений и TRRM. Видно, что только при шаге сетки 12 км в этой области появляются значимые осадки, а становятся они сравнимыми с фактическими значениями, хотя и занижаются, только при шаге 4 км. Очевидно, что моделирование с высоким разрешением способно обеспечить более реалистичные поля осадков.

Аналогичные соображения можно высказать и в отношении других рассматриваемых экспериментов (табл. 1) и случаев выпадения осадков, указанных в таблице 2.

На рис. 3 представлены бокс-диаграммы количественных оценок прогноза осадков. Приведены ошибки прогноза количества осадков для десяти случаев по данным станций, характеристика которых приведена в табл. 2. В каждом квадрате рис. 3 приведена оценка конкретной ошибки для трех доменов и четырех градаций суточного количества осадков.

Как видно из рис. 3 *а* и 3 *д*, во всех доменах значения осадков в градации 0–5 мм/сут. завышены в 3–5 раз, а в градации 5–15 мм/сут. в 0,5–1,5 раза. В градации сильных осадков (15–40 мм/сут.) ошибки наименьшие, а для случаев очень сильных осадков (свыше 40 мм/сут.) занижены в 0,5 раза (рис. 3 *а* и 3 *д*). Значения коэффициента корреляции (CORR, рис. 3 *в*) в основном по всем доменам положительные. Прогноз в домене DO3 демонстрирует лучшее качество.

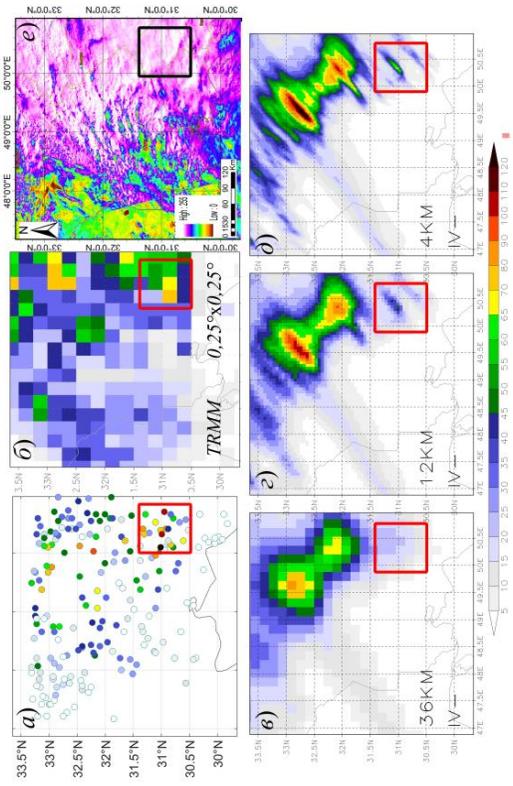


Рис. 2. Суточное количество осадков для случая «№ 6» было эксперименту «IV» над юго-западом Ирана:

- а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию);
- б) данные TRMM;
- в) снимок Aqua/MODIS с характеристикой отражаемости облаков;
- г) DO1, шаг 36 км; д) DO2, шаг 12 км; е) DO3, шаг 4 км.

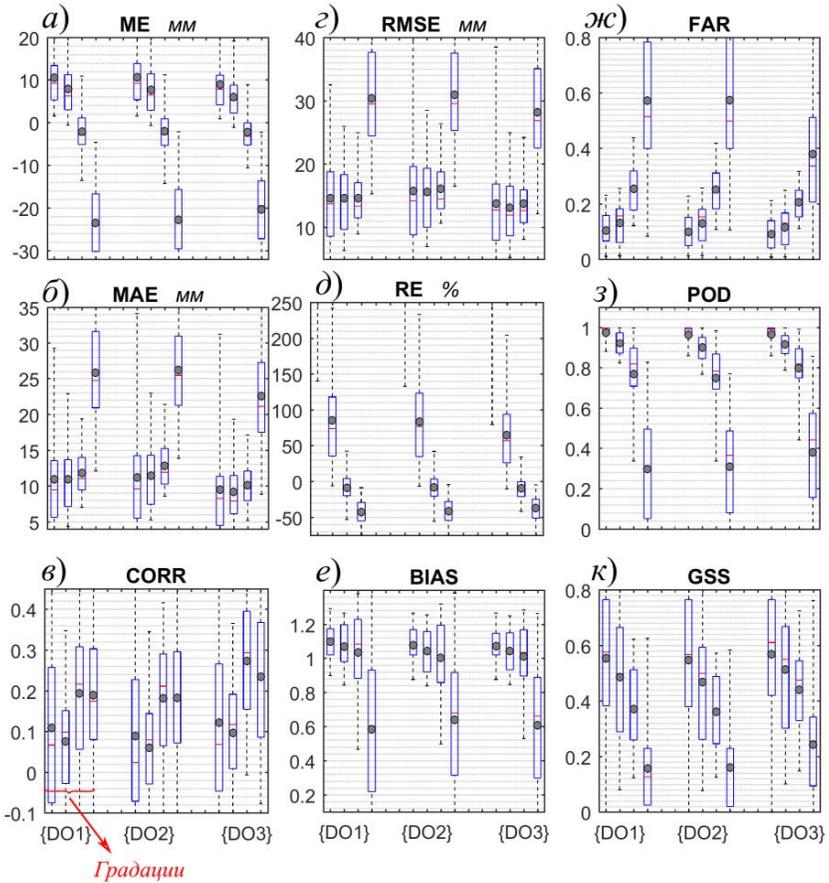


Рис. 3. Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); MAE (б); CORR (в); RMSE (г); RE (д) и качественного анализа BIAS (е); FAR (ж); POD (з) и GSS (к) для трех типов доменов (DO1, DO2 и DO3) по десяти случаям (таблица 2).

Прямоугольниками выделена область, заключенная между первым и вторым квантилем; серыми кружками отмечено среднее значение.

Индекс BIAS (рис. 3 е) подтверждает во всех доменах завышение моделью количества слабых осадков (BIAS варьируется от 1,03 до 1,20) и занижение количества сильных осадков (0,63). Средние же осадки (5—15 мм/сут.) воспроизводятся моделью очень хорошо (0,93—1,30 со средним значением 1,05).

Индексы FAR и POD для всех типов доменов в первых двух градациях не показывают значительной разницы. Но начиная с количества осадков 15 мм/сут. преимущество самой мелкой сетки (DO3) очевидно. Суммируя вышесказанное, для градации сильных осадков можно отметить выполнение неравенств:

$$0 < FAR_{DO3} < FAR_{DO2} < FAR_{DO1} < 1; \quad (1)$$

$$0 < POD_{DO1} < POD_{DO2} < POD_{DO3} < 1; \quad (2)$$

$$0 < BIAS_{DO1 \text{ и } DO2} < BIAS_{DO3} < 1. \quad (3)$$

Из (1), (2) и (3) следует, что либо «число пропусков цели» во внешних доменах было больше, чем во внутреннем ($C_{DO1 \text{ и } DO2} > C_{DO3}$), либо число успешных прогнозов во внешних доменах было меньше, чем во внутреннем ($A_{DO1 \text{ и } DO2} < A_{DO3}$). В обоих вариантах можно отметить преимущество внутреннего домена DO3 над внешними доменами (DO1, DO2).

Для всех градаций и всех доменов значение критерия GSS положительно, что подтверждает способность модели успешно прогнозировать осадки. По анализу коэффициента успешности GSS (рис. 3 к) лучшим по всем градациям также является домен DO3.

По результатам анализа всех оценок, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что домен с самым маленьким шагом сетки (DO3) позволяет моделировать осадки с наименьшими ошибками. Наибольшая чувствительность к шагу сетки наблюдается при прогнозе сильных осадков.

На рис. 4 в качестве примера приведены поля суммарного количества осадков за сутки на юго-западе Ирана для случая № 1 (табл. 2) во всех экспериментах (табл. 1) на сетках с самым хорошим разрешением (домены DO3) и фактические данные наблюдений, TRMM и снимок Aqua/MODIS.

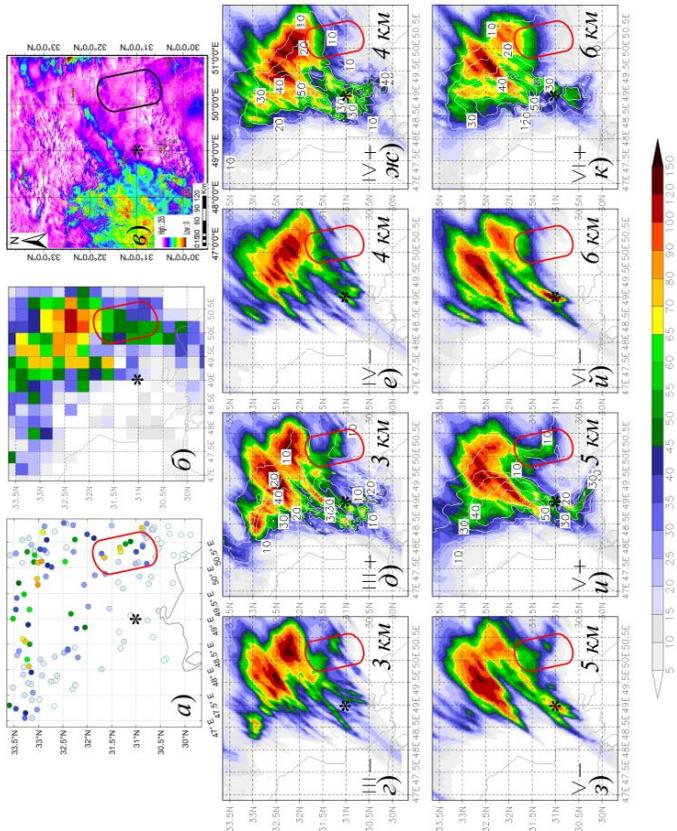


Рис. 4. Суммарное количество осадков за сутки для случая «№ 1» на юго-западе Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию) данные; (б) данные TRMM; (в) снимок Aqua/MODIS; модельные поля в домене DO3 в экспериментах: (с) «III+», (д) «IV-», (е) «V+», (ж) «VI-», (з) «V+», (и) «VI-», (к) «VI+»; белым контуром (с интервалом 10 мм/сут.) обозначены изолинии количества конвективных осадков.

На основании сравнения фактических и модельных результатов видно, что во всех внутренних доменах DO3 неплохо воспроизводится пространственная структура поля осадков. Сравнивая между собой поля, представленные на рисунках 4 *г* и 4 *д*, 4 *е* и 4 *ж*, 4 *з* и 4 *и*, а также на рисунках 4 *й* и 4 *к*, можно отметить, что качество прогноза зависит не только от шага самой сетки, но и от разрешения материнских доменов.

Ни в одном из представленных модельных полей нет полного соответствия данным наблюдений. Не наблюдается четкой зависимости улучшения качества моделирования при уменьшении шага сетки. Во всех экспериментах количество осадков завышается. Наименьшее завышение максимальных значений количества осадков наблюдается в эксперименте «VI+».

Анализ результатов в регионе, выделенном красным контуром, где наблюдаются сильные осадки, показывает, что в нем прогнозируются осадки только в экспериментах с шагом сетки 3 и 5 км.

На всех полях рис. 4 символом «*» отмечена точка с координатами 31° с. ш., 49° в. д., где прогнозировались осадки, либо не наблюдавшиеся, либо смещенные относительно наблюдавшихся, а количество осадков оказалось завышенным. При этом отсутствие *ПК* приводило к повышению модельного количества осадков, что особенно хорошо прослеживается в экспериментах «III-», «IV-» и «VI-» (см. рис. 4 *г*, *е*, *к*). Наиболее близкие к действительности результаты в этой точке получены при моделировании с шагом 3 км без *ПК*.

Очевидно, что лучшие результаты получены на сетках с шагами 5, 6 и 3 км (эксперименты «V+», «VI+» и «III+» соответственно), худший — эксперимент «VI-», а моделирование на сетке с шагом 4 км показывает промежуточные по своему качеству результаты.

Из этого следует, что для используемых шагов сетки наличие *ПК* во внутреннем домене позволяет приблизить результаты моделирования осадков к их фактическим значениям.

Обобщая анализ всех экспериментов, можно сделать вывод о том, что лучшее качество моделирования слабых осадков (например, место, отмеченное символом «*») получено в экспериментах без *ПК*,

а для сильных осадков — в эксперименте «VI+», использующем грубую сетку и ПК в домене DO3. При этом использование ПК приводит к завышению количества слабых осадков

На рис. 5 представлены статистические индексы для разных градаций количества осадков по доменам DO3. В результате анализа можно сделать вывод о том, что для слабых осадков меньшие ошибки получены в экспериментах «IV-» и «VI-», для второй градации к этим экспериментам добавляются еще и эксперименты «IV+» и «III-». Для сильных и очень сильных осадков лучшие результаты получены в эксперименте «VI+», а следующим с точки зрения минимума ошибок является эксперимент «III+».

Интересно дать сводную оценку качества воспроизведения осадков при разных экспериментах. Однако простое осреднение оценок по всем случаям не позволяет четко уловить отличия. Поэтому все оценки для каждого случая были ранжированы. Например, в случае № 1 для градации 5—15 мм самая маленькая ошибка ME была в эксперименте «VI-», а самая большая — в эксперименте «V+». Поскольку было всего восемь экспериментов, то лучшему «VI-» присвоено 8 баллов, а худшему «V+» — 1 балл. Таким образом, если бы метод «VI-» оставался лучшим для всех случаев, то он набрал бы 80 баллов, а худший метод мог бы получить 10 баллов. В табл. 3 для всех оценок приведены суммы баллов каждого эксперимента по всем случаям, полученные по формуле (4):

$$\Psi_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{i,j}, \quad (4)$$

где n — число прогнозируемых случаев, а α_i — количество баллов, набранное рассматриваемой оценкой в эксперименте i ($1 \leq \alpha_i \leq 8$, $\alpha_i \in \mathbb{N}$).

Не рассматривались случаи самых слабых осадков, так как результаты не сильно различаются. В каждой клетке табл. 3 на самой верхней строке указано название эксперимента, имеющего самую высокую оценку (лучшее качество), которая приведена в скобках.

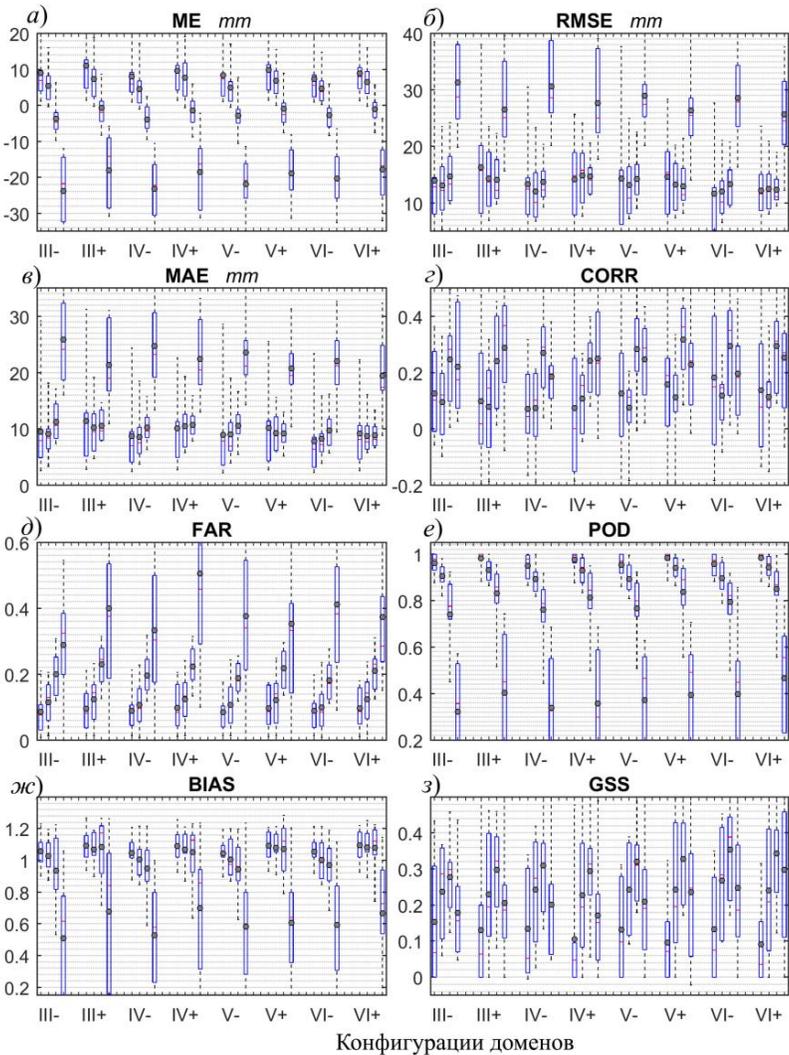


Рис. 5. Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); RMSE (б); MAE (в); CORR (г) и качественного анализа FAR (д); POD (е); BIAS (ж) и GSS (з) для шести типов доменов DO₃ (III-, III+, IV-, IV+, V-, V+, VI-, VI+) и по десяти случаям.

Таблица 3

**Ранжированный по Ψ_j список оценок
совокупности экспериментов для доменов DO3**

Градация сутки	ME	MAE	RMSE	CORR	Градация сутки	BIAS	FAR	POD	GSS	
5—15	VI- (62)	IV- (61)	IV- (57)	V+ (55)	5	III- (63)	VI- (72)	VI+ (64)	VI- (56)	
	IV- (56)	VI- (56)	VI- (54)	VI+ (51)		III+ (54)	V- (59)	V+ (60)	IV- (46)	
	V- (56)	VI+ (49)	VI+ (53)	IV+ (50)		IV- (54)	IV- (56)	III+ (58)	V- (46)	
	III- (49)	V- (48)	V+ (53)	VI- (46)		V- (48)	III- (46)	IV+ (52)	V+ (46)	
	V+ (44)	III- (46)	III- (43)	III- (43)		IV+ (39)	V+ (37)	VI- (36)	III+ (44)	
	VI+ (42)	V+ (45)	V- (42)	III+ (43)		V+ (36)	III+ (34)	III- (32)	VI+ (44)	
	III+ (27)	IV+ (29)	III+ (33)	IV- (40)		VI- (36)	IV+ (29)	IV- (31)	III- (41)	
	IV+ (24)	III+ (26)	IV+ (25)	V- (32)		VI+ (30)	VI+ (27)	V- (27)	IV+ (37)	
	VI- (62)	V+ (69)	VI+ (66)	V+ (61)		15	VI- (58)	VI- (68)	VI+ (67)	VI- (64)
	IV- (56)	VI+ (66)	V+ (63)	VI+ (56)			V- (58)	V- (59)	V+ (63)	VI+ (55)
V- (56)	VI- (54)	VI- (52)	VI- (53)	IV- (49)	IV- (55)		III+ (56)	V- (50)		
III- (49)	IV- (42)	IV- (44)	V- (48)	VI+ (47)	III- (48)		IV+ (43)	V+ (48)		
V+ (44)	V- (40)	III+ (39)	IV- (42)	V+ (40)	VI+ (40)		VI- (41)	IV- (42)		
VI+ (42)	III+ (32)	V- (37)	III- (34)	III- (38)	V+ (36)		V- (34)	IV+ (39)		
III+ (27)	IV+ (32)	IV+ (30)	III+ (33)	IV+ (38)	IV+ (30)		IV- (31)	III+ (38)		
IV+ (24)	III- (25)	III- (29)	IV+ (33)	III+ (32)	III+ (24)		III- (25)	III- (24)		
III+ (64)	VI+ (72)	VI+ (64)	III+ (53)	40	III+ (52)		VI+ (54)	VI+ (60)	VI+ (59)	
IV+ (61)	V+ (59)	III+ (63)	IV+ (50)		VI+ (51)		III- (52)	III+ (59)	III+ (51)	
VI+ (60)	III+ (57)	V+ (59)	VI+ (49)		IV+ (51)	IV- (52)	VI- (45)	V+ (48)		
V+ (55)	IV+ (49)	IV+ (54)	V+ (47)		VI- (46)	V+ (50)	V+ (43)	VI- (46)		
VI- (39)	VI- (45)	VI- (38)	V- (44)		V+ (43)	VI- (49)	III- (40)	IV- (45)		
V- (33)	V- (31)	V- (33)	III- (42)		V- (40)	III+ (37)	IV+ (40)	III- (43)		
IV- (25)	IV- (26)	IV- (25)	VI- (39)		IV- (39)	V- (36)	IV- (38)	V- (36)		
III- (23)	III- (21)	III- (24)	IV- (36)		III- (38)	IV+ (30)	V- (35)	IV+ (32)		

Жирным шрифтом выделен эксперимент «VI+», чтобы подчеркнуть тот факт, что именно он позволяет получать хорошие результаты для большинства градаций и индексов. Надо отметить, что в эксперименте «VI+» внутренний домен имеет больший шаг по горизонтали (6 км) и используется *ПК*.

В каждой клетке таблицы эксперименты отсортированы от лучшего к худшему качеству моделирования осадков. В скобках приведены суммы баллов Ψ_j .

Как из таблицы 3, так и из рисунка 5 можно сделать следующие выводы:

— Для градации слабых и средних осадков включение *ПК* в DO3 улучшает качество прогноза, а для сильных и очень сильных осадков имеют место меньшие ошибки моделирования, когда *ПК* в DO3 не включалась.

— При этом в градации слабых и средних осадков лучшие оценки качества прогноза получены в эксперименте «IV–», а для сильных и очень сильных осадков — в экспериментах «VI+» и «III+». Это значит, что *ПК* на мелкой сетке позволяет улучшить качество прогноза сильных осадков, но может приводить и к ложному прогнозу слабых осадков (ошибка «ложная тревога»).

— В анализируемых экспериментах домен с шагом 6 км (DO3) имеет материнский домен (DO1) с шагом 54 км. Это значит, что данные FNL (в Иране примерно 100×100 км) сначала интерполируются на более грубую сетку (54 км), а потом на сетку 18 и 6 км. А, например, для экспериментов «III+» (3 км) DO1 имеет шаг 27 км. Значит, первоначальная интерполяция производится с сетки с шагом 100 км на сетку с шагом 27 км, что может сказаться на ухудшении качества моделирования. Это тоже требует дальнейших исследований.

Несколько неожиданным стал тот факт, что сетки с четным шагом (4 и 6 км) показывают лучшие результаты при моделировании. Конечно, для уточнения этого нужно провести дополнительные и детальные исследования.

Сведения для дополнительного анализа приведены на рис. 6. Там показаны индексы GSS и RMSE для доменов DO3 по всем случаям.

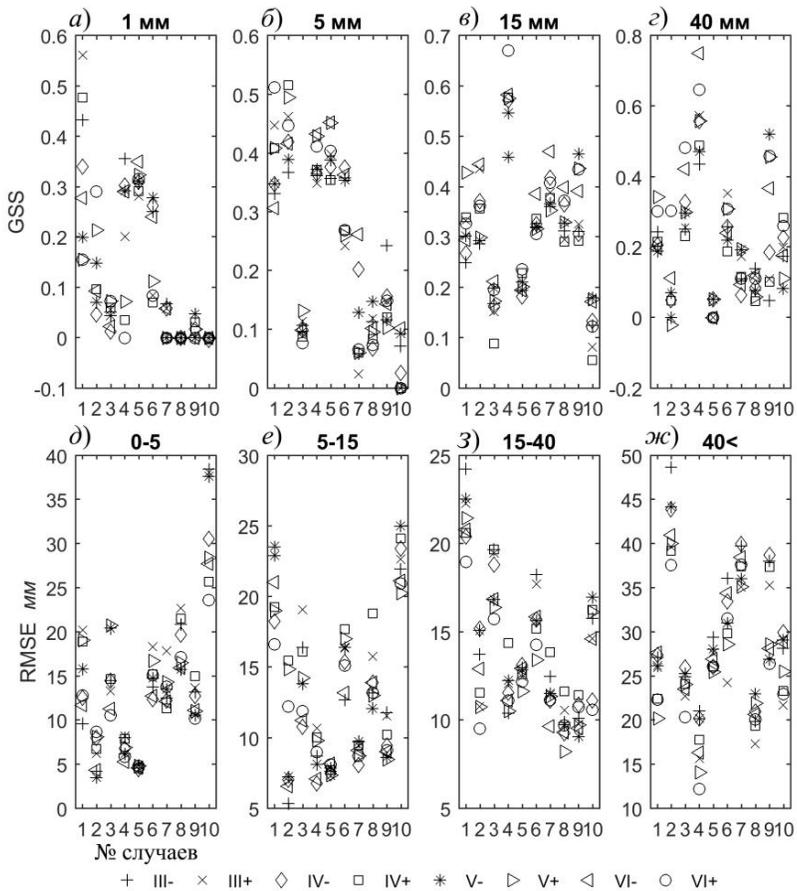


Рис. 6. Оценки GSS для градий: 1 (а); 5 (б); 15 (в) и 40 мм/сут. (г), и RMSE для градий: 0—5 (д); 5—15 (е); 15—40 (з) и свыше 40 мм/сут. (ж) для каждого случая из таблицы 2.

Из анализа рисунка 6 а, где представлены значения GSS для градации 1 мм/сут., видно, что для случаев № 1—6 GSS положительные, а для остальных равны нулю. Такие значения индекса объясняются тем, что осадки были обширные, и модель правильно прогнозировала факт наличия/отсутствия осадков, но этот индекс не характеризует прогноз количества осадков для этой градации и не может быть использован для сравнения экспериментов.

Сравнить эксперименты можно, проанализировав значения RMSE, которые в случаях нулевых GSS больше других (см. рис. 6 д), а значит, модель завышает количество слабых осадков, за счет чего и возникают GSS = 0.

Для градации 5 мм/сут. (рис. 6 б) получены хорошие оценки экспериментов «IV–», «V+» и «VI+». В большинстве случаев эксперимент «IV–» при меньших RMSE характеризуется большими GSS (см. рис. 6 а, д, б и е). Это значит, что для прогноза осадков этой градации лучшие результаты можно получить, если не использовать ПК в домене D03.

Для третьей градации осадков (рис. 6 в и б з) эксперименты «VI+» и «IV–» показывают лучшие результаты по GSS, чем остальные. Однако в эксперименте «VI+» значение RMSE меньше, чем в эксперименте «IV–». Значит, сильные осадки лучше воспроизводятся моделью с ПК.

Для градации очень сильных осадков, более 40 мм/сут. (см. рис. 6 г и б ж), видно, что эксперимент «VI+» дает хорошие оценки GSS. Однако возникают случаи с отрицательными значениями GSS (случай № 2). А для случая № 5 значения GSS неудовлетворительны для всех экспериментов, в том числе и для эксперимента «VI+». Это связано с тем, что очень сильные осадки наблюдались на малом количестве (15 %) станций (табл. 2), и полученные для случая № 5 оценки неинформативны.

Таким образом, как и по предыдущим анализам, видно, что для более успешного прогноза сильных и очень сильных осадков даже в домене с самым малым шагом D03 следует включать ПК. При этом в домене D03 в экспериментах с шагом 6 км моделирование точнее, чем в экспериментах с меньшими шагами сетки.

Заключение

Резюмируя все вышесказанное, следует отметить, что качество моделирования осадков значительно и нелинейно зависит от разрешения модели. Важен не только выбор шага сетки наименьшего домена, принятого для получения окончательного результата моделирования, но и то, какое разрешение было у материнских сеток.

При моделировании осадков на территории юго-западного Ирана со сложным рельефом лучшим оказался эксперимент «VI+» со следующими характеристиками домена: трехступенчатая телескопизация с шагом 54 км во внешнем домене, 18 км в первом вложенном домене и 6 км для внутреннего домена, по которому и оценивается воспроизведение осадков.

Важно отметить, что во всех доменах, включая внутренний, оказалось полезным использовать параметризацию конвекции, хотя конвекция на мелких сетках может считаться сеточным явлением. Можно рекомендовать проводить исследования влияния параметризации конвекции и для внутреннего домена при каждой настройке модели.

Слабые и умеренные осадки оказались лучше воспроизведены, когда параметризация конвекции не была включена. Включение этой параметризации особенно сильно повлияло на улучшение качества прогнозов в градации очень сильных осадков.

Авторы выражают благодарность ресурсному центру «Вычислительный центр СПбГУ» (<http://cc.spbu.ru>) за предоставленную возможность провести необходимый объем расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вельтищев Н. Ф., Жупанов 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—134.

Исаев Э. К., Мостаманди С. В., Анискина О. Г. (2015). Оценка влияния параметризаций физических процессов в гидродинамической модели WRF на качество прогноза атмосферных процессов в районе со сложным рельефом на примере территории Киргизии // Ученые записки РГГМУ. Вып. 40. С. 30—41.

Маддах М. А., Русин И. Н., Ахунд-Али А. М. (2017). Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана // Труды ГГО. Вып. 586. С. 191—204.

Русин И. Н., Маддах М. А. (2017). Количественные характеристики максимальных осадков юго-западного Ирана // Труды ГГО. Вып. 585. С. 142—157.

I.R.I.M.O. (2008). Iranian Meteorological Office Data Processing Center. Islamic Republic of Iran Meteorological Office, Ahvaz, Iran.

Cassola F., Ferrari F., Mazzinob A. (2015). Numerical simulations of Mediterranean heavy precipitation events with the WRF model: A verification exercise using different approaches // Atmospheric Research. V. 164. P. 210—225.

Davis C., Bosart L. F. (2002). Numerical Simulations of the Genesis of Hurricane Diana (1984). Part II: Sensitivity of Track and Intensity Prediction // Mon. Wea. Rev. V. 130. P. 1100—1124.

Efstathiou G. A., Zoumakis N. M., Melas D., Lolis C. J., Kassomenos P. (2013). Sensitivity of WRF to boundary layer parameterizations in simulating a heavy rainfall event using different microphysical schemes. Effect on large-scale processes // Atm. Res. V. 132—133. P. 125—143. ISSN 0169-8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.05.004>.

Flesch T. K., Reuter G. W. (2012). WRF model simulation of two Alberta flooding events and the impact of topography // J. Hydrometeorol. V. 13. P. 695—708.

Ghafarian P., Azadi M., Meshkatee A. H., Farahani M. M. (2012). Numerical simulation of the impact of Anatolian and Caucasus Mountains on the precipitation distribution over the Black Sea // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 12. P. 607—613.

Giannaros T. M., Kotroni V., Lagouvardos K. (2015). Predicting lightning activity in Greece with the Weather Research and Forecasting (WRF) model // Atmospheric Research. V. 156. P. 1—13.

Gsella A., de Meij A., Kerschbaumer A., Reimer E., Thunis P., Cuvelier C. (2014). Evaluation of MM5, WRF and TRAMPER meteorology over the complex terrain of the Po Valley, Italy // Atm. Env. V. 89. P. 797—806. ISSN 1352-2310. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.019>.

Hernández-Ceballos M. A., Adame J. A., Bolívar J. P., de la Morena B. A. (2013). A mesoscale simulation of coastal circulation in the Guadalquivir valley (southwestern Iberian Peninsula) using the WRF-ARW model // Atm. Res. V. 124. P. 1—20. ISSN 0169-8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.12.002>.

Li X., Pu Z. (2009). Sensitivity of numerical simulations of the early rapid intensification of Hurricane Emily to cumulus parameterization schemes in different model horizontal resolutions // *J. Meteor. Soc. Japan*. V. 87. P. 403—421.

Lin Y. L., Farley R., Orville H. D. (1983). Bulk parameterization of the snowfield in a cloud model // *J. Climate Appl. Meteor.* V. 22. P. 1065—1092.

McFarquhar G. M., Zhang H., Heymsfield G., Halverson J. B., Hood R., Dudhia J., Marks F. (2006). Factors Affecting the Evolution of Hurricane Erin (2001) and the Distributions of Hydrometeors: Role of Microphysical Processes // *J. Atmos. Sci.* V. 63. P. 127—150. <https://doi.org/10.1175/JAS3590.1>.

Moazami S., Golian S., Kavianpour M. R., Hong Y. (2014). Uncertainty analysis of bias from satellite rainfall estimates using copula method // *Atmospheric Research*. V. 137. P. 145—166.

Nasrollahi N., Aghakouchak A., Li J., Gao X., Hsu K., Sorooshian S. (2012). Assessing the Impacts of Different WRF Precipitation Physics in Hurricane Simulations // *Weather and Forecasting*. V. 27. P. 1003—1016.

NCAR (2014) // User's Guides for the Advanced Research WRF (ARW) v.3.6 Modeling System. <http://www2.mmm.ucar.wrf/users/docs>.

Pennelly C., Reuter G., Flesch T. (2014). Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta // *Atmospheric Research*. V. 135. P. 172—192.

Roberts N. M., Cole S. J., Forbes R. M., Moore R. J., Boswell D. (2009). Use of high-resolution NWP rainfall and river flow forecasts for advance warning of the Carlisle flood, north-west England // *Meteor. Appl.* V. 16. P. 23—34.

Roberts N. M., Lean H. W. (2008). Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events // *Mon. Weather Rev.* V. 136. P. 78—97.

Schaefer J. T. (1990). The critical success index as an indicator of warning skill // *Weather Forecast*. V. 5. P. 570—575.

Schlüter I., Schädler G. (2010). Sensitivity of Heavy Precipitation Forecasts to Small Modifications of Large-Scale Weather Patterns for the Elbe River // *J. Hydrometeor.* V. 11. P. 770—780. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1186.1>.

Sun Y., Yi L., Zhong Z., Hu Y., Ha Y. (2013). Dependence of model convergence on horizontal resolution and convective parameterization in simulations of a tropical cyclone at gray-zone resolutions // *J. Geophys. Res. Atmos.* V. 118. P. 7715—7732. [doi:10.1002/jgrd.50606](https://doi.org/10.1002/jgrd.50606).

Yu X., Lee T.-Y. (2010). Role of convective parameterization in simulations of a convection band at grey-zone resolutions // *Tellus*. V. 62. P. 617—632.

О СОСТОЯНИИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И АКТИНОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТЕЙ В 2017 ГОДУ

*С. Ю. Гаврилова, Т. А. Иванова, Л. В. Луцько, А. Е. Ерохина,
А. Н. Махоткин, Л. И. Коломеец, А. Ф. Садыкова*

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

Поступила в редакцию 24.05.2018

Введение

В 2009—2012 гг. в рамках реализации проекта Росгидромет-1 на метеорологическую сеть Росгидромета были поставлены современные средства измерения метеорологического и актинометрического назначения: автоматизированные метеорологические и актинометрические комплексы (АМК и ААК), предназначенные для станций с персоналом, и автоматические метеорологические станции без персонала (АМС). На смену части устаревших, многократно выработавших технический ресурс средств измерения (СИ) метеорологического назначения практически на всей наблюдательной сети внедрены АМК, содержащие датчики температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, параметров ветра, температуры подстилающей поверхности. Масштабность проекта Росгидромет-1 позволила оснастить практически всю метеорологическую сеть страны однотипными приборами, что обеспечило необходимую сопоставимость данных наблюдений по всей территории страны.

При этом следует отметить, что инструментальная комплектация АМК и АМС, поставленных по проекту Росгидромет-1, позволяет получать автоматическими методами только 40 % информации из

утвержденной программы метеорологических наблюдений на станции с персоналом. Остальные 60 %, в т. ч. и информацию об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, получают с помощью наблюдателя либо по визуальным наблюдениям, либо с использованием автономного оборудования производства 70—80-х годов прошлого века. В частности, к таким видам оборудования относится оборудование для измерения существенных метеорологических параметров — метеорологической дальности видимости, высоты нижней границы облаков, количества и интенсивности атмосферных осадков всех видов, продолжительности солнечного сияния, высоты снежного покрова, температуры почвы под естественным покровом и на оголенном участке и др.

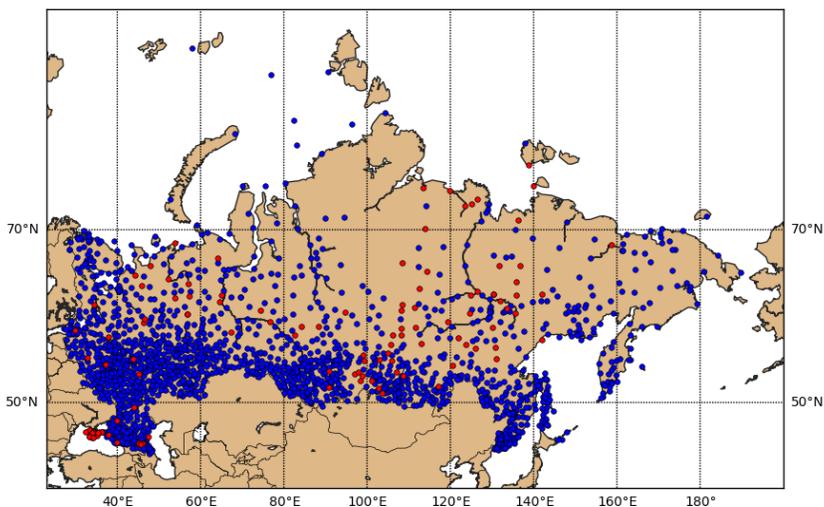


Рис. 1. Сеть станций Росгидромета с метеорологическими наблюдениями.

- — станции с функционирующими АМК и АМС,
- — неавтоматизированные станции с персоналом.

По состоянию на конец 2017 года на метеорологической сети Росгидромета находилось в установке: 1487 АМК на станциях с персоналом и 346 АМС на станциях без персонала (таблица 1, рис. 1).

В работоспособном состоянии находилось 94 % АМК и 92 % АМС от установленных.

К настоящему времени не автоматизировано около 200 метеорологических станций с персоналом (рис. 1). В основном это труднодоступные станции (ТДС), расположенные в регионах с неразвитой инфраструктурой, где присутствуют проблемы со связью, энергоснабжением, в т. ч. недостатком горюче-смазочных материалов (ГСМ), а также с обеспечением регулярного технического обслуживания современного оборудования. По отчетным данным управлений гидрометеорологической службы (УГМС) на 195 ТДС установлены АМК. В 2017 г. функционировало 133 комплекса (68 % от установленных), из них только 97 АМК (50 % от установленных) работали стабильно в течение года.

В 2017 г. началась установка АМК и АМС по проекту Росгидромет-2, на конец года было установлено 7 АМК и 22 АМС. В рамках данного проекта в 2017—2018 гг. должны быть реализованы:

— ввод в эксплуатацию 28 АМК, 3 ААК и 73 АМС в стандартной комплектации;

— ввод в эксплуатацию в составе установленных по проекту Росгидромет-1 АМК дополнительных датчиков (рис. 2): продолжительности солнечного сияния, атмосферных осадков всех видов, метеорологической дальности видимости, высоты снежного покрова, температуры почвы на глубинах, суммарной радиации, лазерного измерителя высоты нижней границы облаков. Внедрение и апробация новых автоматических средств измерений путем их интеграции с АМК, планируется осуществить на 72 станциях (4,5 % от функционирующей сети);

— поставка ремонтных комплектов для АМК и АМС — 41 (при потребности не менее 48 комплектов в год, без учета ТДС);

— ввод в эксплуатацию на 319 станциях энергообеспечивающего оборудования (солнечные панели, ветрогенераторы, АКБ) и на 223 станциях технических средств связи.

Таблица 1

Сведения о функционировании на метеорологической сети АМК, АМС, ААК в 4 квартале 2017 года

	АМК				АМС				Передача информации АМК/АМС				Передача сообщений в коде WAREP			
	Установлено	Законсервировано и/или не работает	Функционирует, но оперативная информация не передается	Функционирует и передает информацию	Всего функционирующих % от установленных	Установлено	Законсервировано и/или не работает	Функционирует, но оперативная информация не передается	Функционирует и передает информацию	% сбора сведений от передатчиков АМК в ГМП РФ	% сбора сведений от передатчиков АМС в ГМП РФ	УТМС (ИТМС)	ГМП РФ			
УТМС	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Башкирское	31	0	0	31	100	6	0	0	6	100	97	23	86	86	31	31
Верхне-Волжское	59	3	0	56	95	22	3	1	18	86	98	0	99	0	59	59
Дальневосточное	86	7	0	79	92	19	4	2	13	79	96	85	80	29	84	81
Забайкальское	80	0	3	77	100	15	2	1	12	87	98	92	88	88	83	83
Западно-Сибирское	120	5	4	111	96	25	6	7	12	76	99	99	99	91	121	121
Иркутское	64	16	2	46	75	—	—	—	—	—	99	43	—	—	75	75
Камчатское	32	2	5	25	94	4	2	1	1	50	98	95	100	0	32	32
Кольмское	31	2	0	29	94	5	3	0	2	40	91	88	74	0	30	30
Крымское	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	24

<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Мурманское	27	0	0	27	100	15	1	0	14	93	100	100	98	69	23	23
Обь-Иртышское	69	0	0	69	100	34	5	0	29	85	99	99	95	56	69	69
Приволжское	67	0	0	67	100	7	0	0	7	100	94	94	94	94	67	67
Приморское	36	0	1	35	100	33	0	1	32	100	100	86	98	27	36	36
Сахалинское	33	0	0	33	100	1	0	0	1	100	98	75	100	100	34	34
Северное	99	0	2	97	100	29	0	1	28	100	95	92	82	41	74	62
Северо-Западное	62	0	3	59	100	16	1	3	12	94	99	99	95	79	60	60
Северо-Кавказское	142	0	8	134	100	20	0	7	13	100	97	97	88	35	149	21
СК ВС	1	0	1	0	100	4	0	4	0	100	0	0	0	0	0	0
ЦАМ	3	0	0	3	100	8	0	0	8	100	100	0	98	0	3	3
Среднесибирское	109	29	7	73	73	11	0	0	11	100	99	55	93	74	108	81
Республики Татарстан	14	0	0	14	100	8	0	0	8	100	98	98	100	100	14	14
Уральское	92	1	2	89	99	4	0	0	4	100	96	86	100	100	92	92
Центральное	94	0	3	91	100	46	0	0	46	100	98	98	98	98	91	91
Центрально-Черноземное	47	1	0	46	98	1	0	0	1	100	99	7	100	0	48	48
Чукотское	22	4	0	18	82	8	0	1	7	100	100	100	43	43	22	22
Якутское	67	12	12	43	82	5	3	2	0	40	94	12	0	0	99	99
Итого: факт	1487	82	53	1352	94	346	30	31	285	92	97	75	93	67	1528	1358

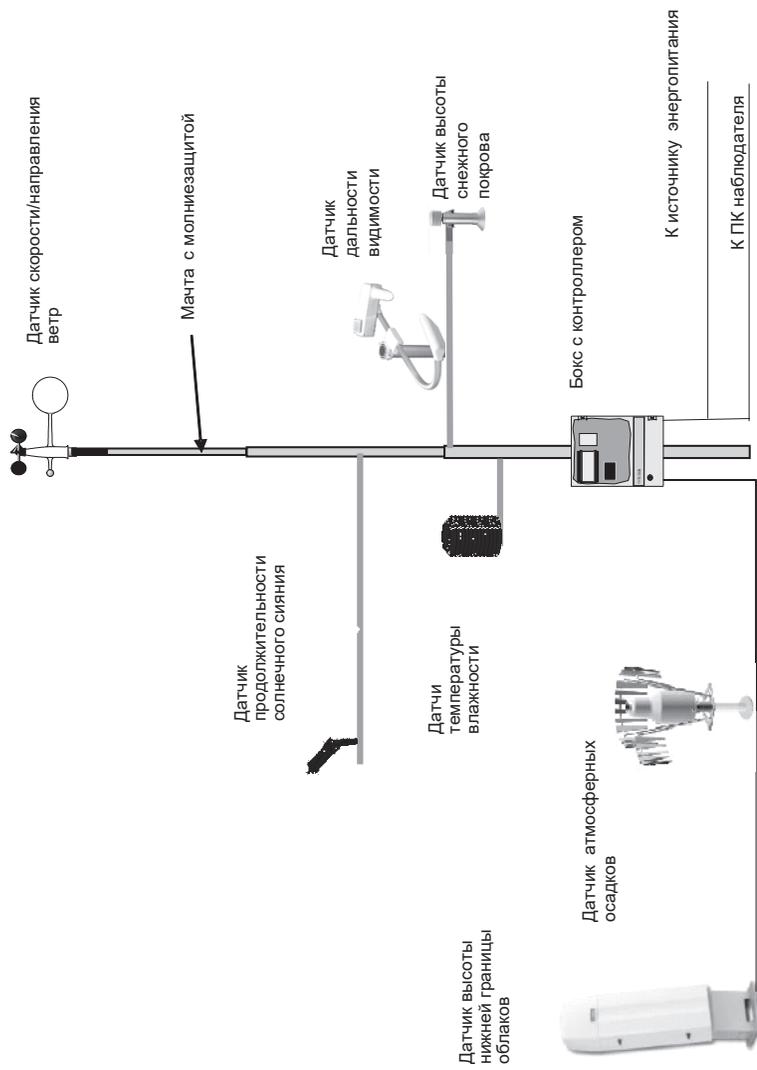


Рис. 2. Общая схема размещения измерительного оборудования АМК в расширенной комплектации.

Актинометрические наблюдения автоматизированы только на 26 станциях (16 % от общего количества).

По состоянию на конец 2017 г. на метеорологической сети Росгидромета работали 18 автоматизированных актинометрических комплексов (ААК), изготовленные фирмой Kipp&Zonen, и 8 актинометрических измерительных комплексов (АИК) российско-белорусского производства. Внешний вид установленных на метеорологической площадке основных узлов комплексов ААК и АИК представлен на рис. 3.



Рис. 3. Комплексы ААК (слева) и АИК (справа).

С помощью ААК и АИК производятся непрерывные круглосуточные автоматизированные измерения основных составляющих радиационного баланса. Различия между ААК и АИК заключаются в составе приборов и вспомогательного оборудования, в алгоритмах обработки результатов измерений и программном обеспечении.

1. Сбор информации АМК, АМС, ААК

Всего на конец 2017 года оперативные сообщения КН-01 поступали от 1352 АМК (90 % от установленных) и 285 АМС (82 % от установленных). Количество АМК и АМС, передающих информацию в коде КН-01, в течение 2017 г. увеличивалось от квартала к кварталу

и с начала года выросло на 4 %. Динамика изменения количества установленных и передающих сообщения в коде КН-01 представлена на рис. 4.

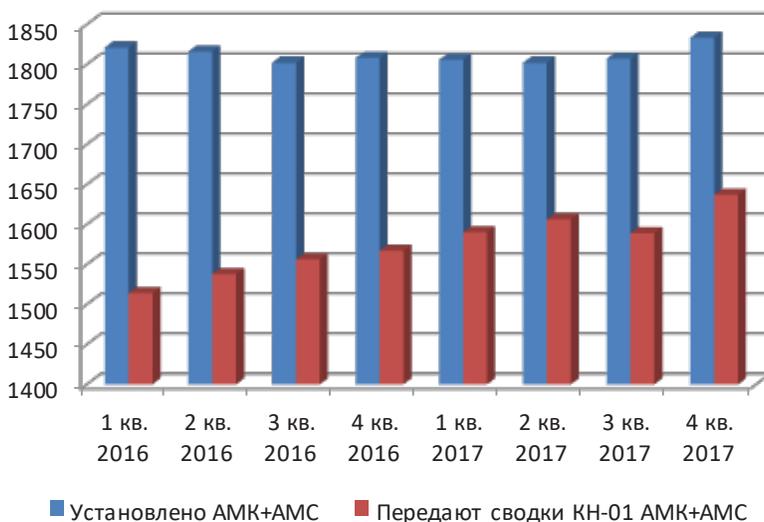


Рис. 4. Динамика изменения количества AMK и AMC, передающих информацию в коде КН-01.

В Северном УГМС за 2017 год количество AMK и AMC, передававших сводки КН-01, увеличилось на 32 %. Если в конце 2016 г. в Северном УГМС информацию передавали 71 AMK и 24 AMC, то в конце 2017 года их уже стало 97 и 28 соответственно.

На конец года 1215 AMK (90 % от передающих сообщения) передали около 100 % информации, что на 12 % больше по сравнению с концом 2016 года. Количество AMC, передававших сообщения в коде КН-01 в полном объеме за 2017 год увеличилось на 23 % и составило 221 AMC (80 % от AMC, передающих информацию).

Сводная диаграмма поступления сводок от AMK и AMC представлена на рис. 5.

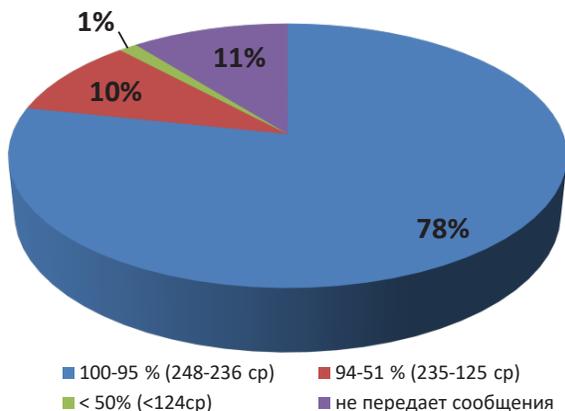


Рис. 5. Диаграмма поступления сводок КН-01 от АМК и АМС в 4 кв. 2017 г.

В 2017 г. возросла стабильность передачи сообщений КН-01 от станций в адрес УГМС. Средний процент сбора информации от функционирующих и передающих данные АМК составляет 94 %, а от АМС — 92 %.

В Обзоре за 2016 год был введен показатель эффективности функционирования автоматизированной наблюдательной метеорологической сети, представляющий собой $K\text{эф}$ — отношение количества АМК и АМС, передавших за отчетный период 95—100 % сводок, к числу установленных в УГМС АМК и АМС:

$$K\text{эф} = \left(\frac{\sum N_{AMK}^{95-100\%} + \sum N_{AMC}^{95-100\%}}{\sum N_{AMK}^{уст} + \sum N_{AMC}^{уст}} \right) * 100\% , \text{ где}$$

$\sum N_{AMK}^{95-100\%}$ — сумма АМК, передавших за отчетный период 95—100 % сводок КН-01;

$\sum N_{AMC}^{95-100\%}$ — сумма АМС, передавших за отчетный период 95—100 % сводок КН-01;

$\sum N_{АМК}^{уст}$ — сумма АМК, находящихся в отчетный период в установке;

$\sum N_{АМС}^{уст}$ — сумма АМС, находящихся в отчетный период в установке.

Средний годовой показатель эффективности функционирования за 2017 г. (рис. 6) рассчитывается как среднее из поквартальных Кэф, без учета АМК и АМС по проекту Росгидромет-2, т. к. они пока не были введены в эксплуатацию.

Все УГМС делятся на четыре уровня, характеризующие степень эффективности функционирования автоматизированной наблюдательной метеорологической сети:

1-ый уровень — $Кэф \geq 90 \%$;

2-ый уровень — $70 \% \leq Кэф < 90 \%$;

3-ый уровень — $50 \% \leq Кэф < 70 \%$;

4-ый уровень — $Кэф < 50 \%$

По итогам 2017 года отнесены к первому уровню эффективности УГМС Республики Татарстан (97 %), Приморское (94 %), СЦГМС ЧАМ (93 %), Центральное (91 %) УГМС.

На рис. 7 продемонстрировано изменение среднего годового показателя уровня эффективности функционирования автоматизированной наблюдательной метеорологической сети за последние три года.

По данным за отчетный период количество станций, которые используют результаты измерений датчиков АМК для режимных обобщений, увеличилось на 78 штук и составило 1231 станцию (88 % от функционирующих АМК).

Как известно, качество оперативной метеорологической информации существенно ниже, чем качество режимных (климатических) данных. Причиной этого является то, что климатическая информация подвергается систематическому многоуровневому контролю качества, а оперативная информация — только выборочному контролю и то, в основном, после ее использования в оперативной практике.



Рис. 6. Средний годовой показатель эффективности функционирования (Кэф, %) автоматизированной сети за 2017 год.

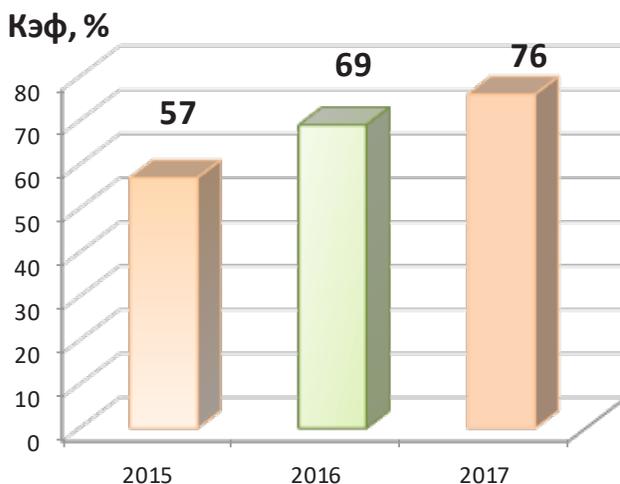


Рис. 7. Средний годовой показатель уровня эффективности.

Кэф — отношение количества АМК и АМС, передавших за отчетный период 95—100% сводок, к числу установленных в УГМС АМК и АМС).

По результатам периодического контроля качества оперативных сообщений в коде КН-01, осуществляемого Гидрометцентром России, основные замечания относятся к качеству данных о количестве атмосферных осадков, получаемых от автоматических датчиков. С целью повышения качества оперативной информации об атмосферных осадках, поступающей от автоматизированной метеорологической сети, ФГБУ «ГГО» было разработано и разослано на сеть Методическое письмо № 26-2017. В письме систематизированы основные проблемы с использованием автоматических датчиков осадков и даны методические рекомендации по их минимизации.

В рамках реализации проекта Росгидромет-2 для наземной метеорологической наблюдательной сети осуществляется разработка нового специального программного обеспечения (СПО) «Автоматизированное рабочее место автоматизированного метеорологического комплекса (АРМ АМК). СПО обеспечивает сбор

данных АМК, ввод других автономно измеряемых и визуально наблюдаемых метеорологических характеристик, первичную обработку, отображение текущих данных измерений, контроль данных, контроль состояния оборудования АМК, формирование сообщений, ведение архивов сообщений и данных наблюдений, передачу сообщений. Все оперативные и режимные сводки будут формироваться непосредственно в новом АРМ АМК, а не в контроллере, как было ранее. Кроме того, в СПО заложена возможность редактирования автоматически измеренных метеорологических параметров в сообщениях и файлах isx. Алгоритмы обработки результатов измерений для получения всех метеорологических характеристик разработаны специалистами ГГО. Правильность их реализации в СПО в настоящее время проверяется.

В новом АРМ заложены формы для ведения всех технических журналов и книжек на станциях в электронном виде. Заполнение книжек и журналов будет максимально автоматизировано. Такие решения позволят передавать в УГМС первичные результаты наблюдений, графики, журналы и т. д. в режиме онлайн, что позволит осуществлять контроль за качеством работы станции, подготовку и редактирование ежемесячников более эффективно и оперативно.

2. Передача штормовых сообщений в коде WAREP

Результаты мониторинга штормовых сообщений в коде WAREP, поступающих с наблюдательных подразделений, выявили наиболее часто повторяющиеся ошибки, на которые следует обращать внимание при контроле качества информационной работы станции:

— задержка по времени передачи штормовых сообщений о возникновении атмосферного явления;

— ошибки в указании правильной даты наступления события по ВСВ: в штормовых сообщениях переход даты осуществляется в 00:00 ВСВ;

— несоблюдение методики наблюдений за окончанием НГЯ и своевременностью передачи отмены, неверно указывается время окончания явления в самом сообщении.

В 2017 г. поступление сообщений в коде WAREP в адрес УГМС обеспечено из всех УГМС с 1528 станций. В 23 УГМС осуществляется передача практически со всех станций за исключением отдельных ТДС. Только в Северном УГМС менее 80 % станций передают сообщения в коде WAREP.

На рис. 8 показана динамика изменения количества станций, передающих штормовые сообщения в коде WAREP в адрес УГМС за период с 2015 по 2017 гг.

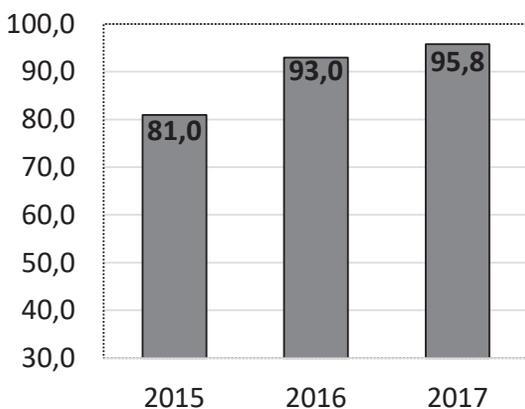


Рис. 8. Доля станций, осуществляющих передачу штормовых сообщений в коде WAREP в адрес УГМС, (% от общего количества станций), за период с 2015 по 2017 гг.

В УГМС с большим количеством ТДС за последние 3 года наблюдается значительный рост числа станций, передающих сообщения в коде WAREP в адрес УГМС (Дальневосточное УГМС (+42,4 %), Среднесибирское (+52,1 %), Иркутское (+44,2 %)).

К концу 2017 г. в Башкирском, Колымском, Крымском, Сахалинском, Уральском, Чукотском, Якутском УГМС и УГМС Республики Татарстан 100 % станций привлечены к подаче штормовой информации в коде WAREP в адрес УГМС и в адрес ГМЦ РФ.

В течение 2017 года из УГМС поступали различного рода методические вопросы по производству наблюдений за метелями, грозой, ветром, гололедно-изморозевыми отложениями, туманом, дымкой, осадками. Наибольшие трудности при наблюдениях за НГЯ вызывают случаи с переходами явления от одной стадии к другой, а также особенности развития одних и тех же явлений в зависимости от физико-географического положения пункта наблюдений. Также вызывает некоторые затруднения и сомнения процесс кодирования дополнительных групп кода при наступлении ОЯ/НГЯ «гололедица на дорогах», «град».

3. Работоспособность ААК и АИК

В течение 2017 года обеспечивалось методическое сопровождение работы ААК и АИК. Материалы наблюдений автоматизированной актинометрической сети, поступившие с сети, обрабатываются на местах месячными массивами, передаются в ГГО, где проходят повторный контроль качества с использованием специализированной программы, и заносятся в режимно-справочный банк данных «Актинометрия» (РСБД).

Основная проблема функционирования автоматизированных комплексов ААК заключается в обеспечении надёжной работы следящей системы (трекера). В отчетный период на ряде станций не удалось восстановить работу трекера. Материалы наблюдений в таких случаях получаются в неполном объеме.

Ввиду того, что недостаточная морозоустойчивость трекера комплекса ААК приводила к сокращению измеряемых радиационных характеристик, работы, направленные на повышение морозоустойчивости трекеров продолжались в 2017 году.

Для испытаний на 5 станциях, имеющих комплексы ААК, были вмонтированы дополнительные платы, изготовленные фирмой Kipp&Zonen и полученные через поставщика — АО «ЛАНИТ». Согласно расчётам фирмы, переоборудованный трекер должен сохранять работоспособность при температуре воздуха до -50 °С. Однако в Якутском УГМС произвели дополнительное утепление

оборудования, благодаря чему работоспособность трекера сохранялась при температуре воздуха до $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Оймякон, 22 января 2017 г.).

В течение всего периода трекеры комплексов АИК, изготовленные ОАО «Пеленг», работали без сбоев. Производитель провел их испытания в термокамере при температуре до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, вследствие чего есть надежда на то, что проблем в процессе работы данных трекеров на сети быть не должно. Однако результаты испытаний в термокамере и испытаний в натуральных условиях могут давать разные результаты, поэтому работоспособность трекеров ОАО «Пеленг» желательно проверить в климатических условиях Якутии.

На большинстве станций случались кратковременные отключения электроэнергии, приводившие к перерывам в наблюдениях от нескольких часов до нескольких дней.

На многих станциях в утренние и вечерние часы наблюдается затенение приборов окружающими объектами (зданиями, деревьями, приборами других установок), что негативно сказывается на результатах наблюдений.

Существующие актинометрические датчики должны поверяться ежегодно. Для проведения поверки рабочие датчики должны быть сняты с мест эксплуатации и отправлены в поверку, а на их место должны быть установлены запасные. Однако ААК и АИК в своих составах запасных актинометрических датчиков не имеют, поэтому в случае отправки в поверку рабочих датчиков происходят перерывы наблюдений. Для поддержания качества актинометрических данных ГГО разработана методика проведения сравнений рабочих приборов с эталоном на местах без отключения их от комплекса. Данная методика может применяться персоналом станции для проверки того или иного датчика в случае появления сомнительных значений в измеряемых данных, а также в период проведения инспекции станции.

4. Работоспособность АМК, АМС

В таблице 2 представлены поквартальные сведения за 2017 и 2016 годы о проценте не поступивших за отчетный период сводок.

Как видно из таблицы, в 2017 г. ситуация со стабильностью поступления данных улучшилась.

Таблица 2

Процент не поступивших сводок от передающих сообщения АМК и АМС

Год	1 квартал		2 квартал		3 квартал		4 квартал	
	АМК	АМС	АМК	АМС	АМК	АМС	АМК	АМС
2017	4	11	3	8	3	6	3	8
2016	5	8	5	9	5	16	5	10

Основные причины отсутствия сводок КН-01 от функционирующих АМК в первую очередь связаны с проблемами со связью (перебои в каналах связи АМК-центр сбора данных и ПК-логгер АМК — 37 % от не поступивших сводок), с выходом из строя оборудования АМК (ПК и/или зависание логгера АМК — 37 % от не поступивших сводок), а также нарушением энергоснабжения (8%). Основные причины отсутствия сводок КН-01 от функционирующих АМС те же, что и для АМК, но при этом их распределение в процентном отношении несколько иное: перебои в канале связи АМС-центр сбора данных составляют 47 % от не поступивших сводок, проблемы в энергоснабжении — 23 %, сбой логгера АМС — 22 % (рис. 9).

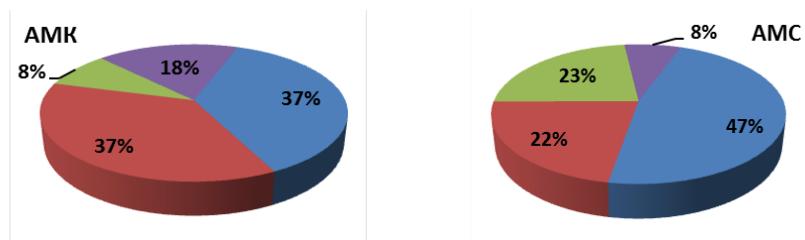


Рис. 9. Причины отсутствия сводок КН-01 от АМК и АМС.

- — связь;
- — отказ АМК/АМС;
- — нарушение в энергоснабжении;
- — иные причины.

Наибольшее число случаев с пропусками сообщений от АМК, вызванное перебоями в канале связи, приходится на Северо-Кавказское УГМС; с отказами оборудования АМК — на Северное и Дальневосточное УГМС. При этом Северное УГМС отмечало в большинстве случаев отказ АМК по причине сбоя программного обеспечения.

Главной причиной нарушения связи на участке АМК — ЦСД является неудовлетворительное качество канала связи: неустойчивая сотовая связь, либо плохая спутниковая или КВ-связь, а также отказы подсистемы связи на стороне АМК (выход их строя коммуникационных модулей).

Основными причинами нарушения энергопитания являются отключение подачи электроснабжения от сети, израсходованный ресурс аккумуляторов, нарушения в работе МАП «Энергия», выход из строя блоков питания.

Среди иных причин УГМС отмечают такие, как обрыв кабеля, акты вандализма, пожары. В Приволжском УГМС среди «иных причин» учитывается демонтаж оборудования АМК и АМС на длительный срок для проведения поверки органами Росстандарта.

По мере приближения срока окончания назначенного производителем ресурса комплексов проблемы с надежностью функционирования оборудования АМК и АМС накапливаются.

Практически на всех АМК, АМС наблюдается сквозная коррозия бокса, на мачтах полимерные зажимы оттяжек рассыпаются, оттяжки и крепежи корродируют, обеспечить требуемое натяжение оттяжек мачты в таком состоянии не представляется возможным. Так, по результатам инспекции Сахалинского УГМС в 2017 г. на большинстве станций специалистам ССИ пришлось произвести замену пришедших в негодность оттяжек мачты АМК на новые более надежные.

В таблице 3 представлено в разрезе УГМС количество вышедших из строя комплектующих и отдельных датчиков АМК, АМС и ААК в 2017 г. В течение года то или иное оборудование АМК/АМС выходило из строя на 549 станциях, т. е. за год на каждой третьей станции. Для сравнения в 2016 году эта цифра составляла 366 станций.

В 2017 г. больше, чем в два раза возросло количество вышедших из строя датчиков температуры и влажности. Количество выходящих из строя датчиков ветра и давления по сравнению с прошлыми годами изменилось незначительно, но при этом, в отличие от датчиков температуры и влажности, которые заменяются в полном объеме, эти датчики заменяются только частично, в связи с их более высокой стоимостью.

Работоспособность измерителей скорости и направления воздушного потока RM Young 05103 может быть повышена за счет своевременной замены прецизионных шариковых подшипников (рис. 10, слева) ступицы и вертикального вала, и потенциометра определения направления ветра. Дополнительным условием для работы RM Young является его правильное заземление. Без заземления при грозе возможно накопление статического электрического заряда с последующим разрядом через преобразователь, что может стать причиной ошибочных показаний или выхода из строя преобразователя.

По-прежнему самым ненадежным в эксплуатации является датчик температуры подстилающей поверхности «Тесей» ТСПТ 300. Новая модификация датчика (№ 3163.10850) имеет те же недостатки в части ненадежности изоляции соединительных проводов, что и прежняя (рис. 10, справа).



Рис. 10. Подшипник для RM Young (слева), датчики температуры подстилающей поверхности «Тесей» ТСПТ 300 старой и новой модификаций (справа).

Таблица 3

Количество вышедших из строя комплектующих АМК, АМС и ААК (в т. ч. по результатам поверки) в 2017 году

№	Датчики	контроллер АМК, АМС, ААК		блок питания		ПК		датчик температуры и влажности воздуха АМК, АМС		датчик ветра АМК, АМС		датчик температуры пов. почвы АМК		датчик давления АМК, АМС		следящая система ААК	
		вышел из строя	заменен, отремонтирован	вышел из строя	заменен, отремонтирован	вышел из строя	заменен, отремонтирован	вышел из строя	заменен, отремонтирован	вышел из строя	заменен, отремонтирован	вышел из строя	заменен, отремонтирован	вышел из строя	заменен, отремонтирован	вышел из строя	заменен, отремонтирован
УТМС																	
1	Башкирское	0	0	0	0	4	4	0	0	1	1	8	10	0	0	0	0
2	Верхне-Волжское	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	Дальневосточное	8	5	1	1	15	13	4	0	3	3	11	4	7	3	0	0
4	Забайкальское	8	7	16	15	8	7	15	15	2	2	4	4	1	1	0	0
5	Западно-Сибирское	13	14	0	0	22	22	1	1	7	3	13	9	8	10	2	1
6	Иркутское	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Камчатское	1	1	5	0	5	4	4	2	10	5	4	2	0	0	0	0
8	Кольмское	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	5	3	0	0
9	Мурманское	1	1	1	1	7	7	1	1	2	2	10	9	2	2	0	0
10	Обь-Иртышское	8	8	2	2	9	7	1	1	2	2	9	9	5	2	1	1
11	Приволжское	0	0	2	2	3	3	1	1	0	0	5	4	0	0	0	0
12	Приморское	1	1	0	0	5	5	3	3	1	1	6	6	1	1	0	0

№	Датчики		контроллер АМК, АМС, ААК	блок питания		ПК		датчик температуры и влажности воздуха АМК, АМС		датчик ветра АМК, АМС		датчик температуры пов. почвы АМК		датчик давления АМК, АМС		следящая система ААК	
	вышел из строя	заменен,		вышел из строя	заменен,	вышел из строя	заменен,	вышел из строя	заменен,	вышел из строя	заменен,	вышел из строя	заменен,	вышел из строя	заменен,	вышел из строя	заменен,
	УГМС																
13	3	3	0	0	2	2	1	1	1	1	1	11	9	4	2	0	0
14	0	0	13	13	39	35	8	8	8	3	2	28	23	5	5	1	1
15	0	0	2	0	0	5	0	0	2	0	7	5	13	0	0	0	0
16	0	0	7	2	5	5	0	0	0	2	1	2	1	2	1	0	0
18	1	1	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	1	4	0	7	7	1	2	0	0	1	6	3	7	1	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0
21	3	0	18	7	12	12	3	1	1	5	4	11	10	2	1	0	0
22	0	2	0	5	0	6	0	0	1	0	1	2	21	1	2	0	0
23	0	0	5	0	3	3	2	1	1	3	1	0	3	1	1	0	0
24	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
25	1	1	4	4	4	4	1	1	1	0	0	2	1	0	0	0	0
	49	45	81	52	151	154	49	45	45	47	39	144	143	52	35	4	3
	67	58	54	57	203	209	35	39	39	47	43	158	126	67	25	4	5
	76	62	90	83	191	204	28	30	30	52	38	159	100	111	53	5	2
	ИТОГО 2017																
	ИТОГО 2016																
	ИТОГО 2015																

Поскольку не все выходящее из строя основное оборудование АМК/АМС заменяется, в эксплуатации на сети уже находятся 140 комплексов с неполным набором работоспособных датчиков. Закупка всего выходящего из строя оборудования осуществляется УГМС за счет внебюджетных источников финансирования, которых явно недостаточно.

Как показывают результаты мониторинга, УГМС практически самостоятельно справляется с заменой частично выходящего из строя оборудования, однако, в ближайшие год-два ситуация может кардинально поменяться, когда потребуется массовая замена АМК/АМС. Если меры по поиску источников финансирования и централизованной замене комплексов не начнут приниматься в самое ближайшее время, то через 5 лет государственная метеорологическая сеть вернется к термометрам и визуальному определению характеристик ветра (ведь многие демонтировали флюгеры, а резервные анеморумбометры М-63, многократно израсходовавшие ресурс, имеются только на 40 % станций).

Выводы

Результаты мониторинга состояния и работоспособности АМК, АМС, ААК на метеорологической наблюдательной сети Росгидромета за 2017 г. позволяют сделать следующие выводы:

Актинометрические наблюдения по ААК и АИК

— материалы наблюдений ААК, АИК поступают в ГГО своевременно, однако в случаях сбоев в работе следящей системы или по причине производства ремонтных работ некоторые станции передают информацию в неполном объеме;

— работоспособность следящей системы ААК при температуре воздуха до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ планируется обеспечить за счет вмонтирования дополнительных плат: обеспечение морозостойкости трекеров приведет к сокращению потерь информации;

— контроллер в составе ААК представляет данные с пропусками за отдельные интервалы времени, пропущенные значения по

возможности восстанавливаются вручную, что позволяет существенно уменьшить брак часовых и суточных сумм составляющих радиационного баланса;

— контроллер типа БЦИ, входящий в состав комплекса АИК, работает без пропусков данных, но дает сбой при их передаче в компьютер, для устранения которых требуется перезагрузка компьютера, после чего информация восстанавливается без потерь;

— Сахалинскому УГМС требуется предпринять меры по обеспечению ежегодной проверки чувствительности актинометра и пиранометров комплекса ААК;

— разработан и разослан в УГМС на отзыв проект Изменения № 1 к РД 52.04.562-96 «Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 5. Актинометрические наблюдения на станциях», включающий две главы, посвященные отдельно комплексам ААК и АИК.

Метеорологические наблюдения по АМК/АМС

— количество установленных АМК и АМС на конец 1917 г. составило 1833 шт., из них 6 АМК и 22 АМС установлены в рамках Проекта Росгидромет–2. В работоспособном состоянии находилось 94 % от установленных АМК и 92 % АМС;

— по данным УГМС на 195 ТДС установлены АМК, из которых в 2017 г. функционировало 68 %, из них только 97 АМК (50 % от установленных) работало стабильно;

— передачу оперативной метеорологической информации в коде КН-01 в течение года осуществляли 1352 АМК (90 % от установленных) и 285 АМС (82 % от установленных);

— средний годовой показатель уровня эффективности функционирования автоматизированной наблюдательной метеорологической сети (*Кэф*) составляет 76 %. По итогам 2017 года к первому уровню эффективности отнесены УГМС Республики Татарстан (97 %), Приморское (94 %), СЦГМС ЧАМ (93 %), Центральное (91 %);

— на 1231 станции (88 % от функционирующих АМК) результаты измерений датчиков АМК используются для режимных обобщений;

— передача сообщений в коде WAREP осуществляется с 1528 станций, что составляет 96 % от общего количества;

— основными причинами пропусков оперативных сообщений от АМК являются проблемы со связью (около 40 % пропусков информации) и с выходом из строя оборудования АМК (около 40 % пропусков информации), на проблемы с энергообеспечением приходится 8 % пропусков информации;

— из 730 АМК и 169 АМС, функционирующих на Европейской части России, за 2017 г. поверено 68 % АМК и АМС. На Азиатской же части России ситуация кардинально отличается: из 671 АМК и 120 АМС поверено 29 % и 38 % соответственно. Кадровые и технические возможности УГМС, а также разная инфраструктура и климатические условия регионов страны не позволяют обеспечить своевременную поверку;

— поверка АМК/АМС должна обеспечиваться без продолжительных перерывов в работе комплексов/станций: либо непосредственно на местах эксплуатации, либо за счет обменного фонда;

— по мере приближения срока окончания назначенного производителем ресурса проблемы с надежностью функционирования оборудования АМК и АМС накапливаются: на каждой третьей станции в течение 2017 г. выходило из строя то или иное основное оборудование АМК/АМС, для сравнения в 2016 году это происходило на каждой пятой станции;

— с целью обеспечения качественного конкурентоспособного функционирования метеорологической наблюдательной сети на современном уровне в ближайшем будущем для Росгидромета уже сейчас требуется поиск источников финансирования, проработка технических решений и планирование замены основных средств измерения метеорологического назначения, которые исчерпают ресурс к 2020 году.

**РЕЖИМ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ
РАЗЛИЧНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ МГУ**

Е. В. Горбаренко, О. А. Шиловцева, И. В. Сошинская

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Географический факультет
119991 Москва, Воробьевы горы
E-mail: catgor@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2018
Поступила после доработки 3.05.2018

Оценка естественной освещенности различно ориентированных вертикальных поверхностей (стен) имеет большое практическое значение, прежде всего при проектировании освещения помещений различного назначения (СНИП 23-05-95; СНИП II-4-79). Большим недостатком действующих строительных норм и правил является отсутствие достоверных сведений о параметрах световой среды города и, в частности, об освещенности стен в различные периоды времени (в течение суток, месяца, года). В нашей стране практически единственные эпизодические наблюдения за освещенностью вертикальных поверхностей были проведены в середине прошлого века (Евневич, Никольская, 1968). В 2012 г. по инициативе О. А. Шиловцевой в метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ) начались регулярные измерения естественной освещенности вертикальных поверхностей, ориентированных на север, юг, запад и восток. Эти наблюдения стали важным дополнением к многолетним наблюдениям за естественной освещенностью горизонтальной поверхности, которые проводятся в МО МГУ уже более полувека (Шиловцева, 2014). К сожалению,

О. А. Шиловцева успела проанализировать и опубликовать только предварительные результаты этих исследований (Эколого-климатические характеристики, 2016). Мы, ее коллеги, посчитали своим долгом закончить начатую ею работу.

В предлагаемой статье представлены результаты анализа режима освещенности различно ориентированных вертикальных поверхностей при различных погодных условиях.

Метод и данные наблюдений

Наблюдения за освещенностью вертикальных поверхностей ориентированных на север, восток, юг, запад, в МО МГУ проводятся с помощью фотометра Daylight Photometer Head Model 910GV фирмы PRC Krochman GmbH (Германия) (рис. 1).

а)



б)



Рис. 1. Прибор Daylight Photometer Head Model 910GV
фирмы PRC Krochman GmbH:
а – внешний вид, *б* – блок датчиков.

Прибор предназначен для измерения естественной освещенности горизонтальной поверхности и четырех вертикальных поверхностей и используется на международной сети наблюдений за световым

режимом местности (CIE/WMO International Daylight Measurement Programme (IDMP), World Network of Daylight Measuring Stations). В качестве датчиков естественной освещенности используются пять фотоэлементов, защищенных специальными стеклянными колпаками. Наличие термостата позволяет использовать прибор в широком диапазоне температур и вести непрерывные наблюдения в течение всего года. Специальный черный экран предотвращает попадание на датчики отраженного света.

Прибор установлен на крыше здания МО МГУ. Закрытость горизонта в южном направлении составляет 10—12 % за счет главного здания МГУ. Во второй половине дня площадка на непродолжительное время затеняется лабораторным корпусом, расположенным к западу от здания МО МГУ.

Контроль фотометра Daylight Photometer Head Model 910GV проводится ежемесячно по фотометру LI-210SL. Пример градуировочного графика приведен на рис. 2.

Контрольный датчик освещенности МО МГУ (фотометр LI-210SL №9498) проходит регулярную поверку по рабочему эталону первого разряда в соответствии с ГОСТ 8.023-2003 (измеритель естественной освещенности № 5801/9-2Б), предоставленному ФГБУ «ГГО». Сравнения, проведенные в сентябре 2017 года, показали, что чувствительность прибора LI-210SL №9498 сохранила свое паспортное значение.

Наблюдения за освещенностью проводятся в режиме непрерывной регистрации с дискретностью 1 мин. При обработке рассчитывались абсолютные значения суммарной естественной освещенности горизонтальной и вертикальных поверхностей за каждую минуту, а также рассчитывались отношения освещенности вертикальной (E_V) к горизонтальной (E_G) поверхности для южной (E_S), северной (E_N), западной (E_W) и восточной (E_E) ориентаций. На основе этих материалов были получены часовые, суточные, месячные, годовые значения E_V и соответствующие отношения E_V/E_G за период 2014—2017 гг. По ежечасным визуальным наблюдениям за облачностью были сформированы выборки для безоблачного и малооблачного неба и сплошного покрова облаков нижнего яруса

(10/10). Анализ особенностей освещенности вертикальных поверхностей проведен для безоблачного, пасмурного неба и при средних условиях облачности.

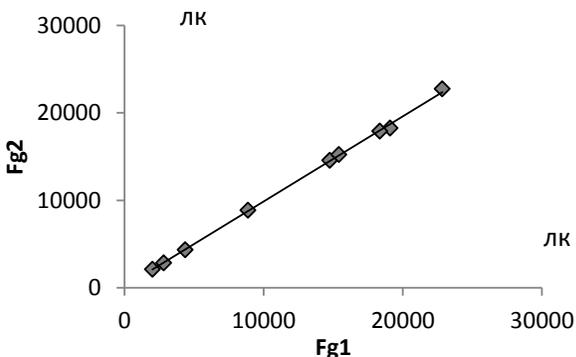


Рис. 2. Пример градуировочного графика:

Fg1 – освещенность по фотометру Daylight Photometer Head Model 910GV,
Fg2 – освещенность по фотометру LI-210SL.

Попытка рассмотрения изменения E_v при других градациях облачности результатов не дала.

Анализ данных

Суммарная освещенность определяется прямой и рассеянной солнечной радиацией. Для вертикальных поверхностей различной ориентации вклад прямой и рассеянной освещенности в суммарную освещенность существенно отличается от вклада этих составляющих в освещенность горизонтальной поверхности. Это связано с тем, что наряду с основными факторами, формирующими естественную освещенность (высота солнца, прозрачность атмосферы, количество и форма облаков, расположение облаков относительно солнечного диска, альbedo подстилающей поверхности), важным фактором

становится азимут солнца. Положение солнца на небосводе определяет возможную продолжительность облучения вертикальных поверхностей разной ориентации прямой радиацией. На рассеянную освещенность в большей степени влияет количество и форма облаков.

В условиях безоблачной атмосферы основной вклад в освещенность вертикальных поверхностей в течение суток вносит прямая составляющая, поэтому различия в освещенности различно ориентированных вертикальных поверхностей велики. В пасмурную погоду различия в освещенности стен сглаживаются (рис. 3).

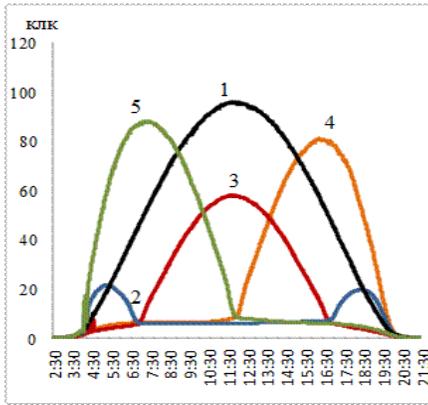
Наиболее отчетливо влияние высоты и азимута солнца на освещенность стен различной ориентации прямой солнечной радиацией проявляется в ясные летние дни. С увеличением высоты солнца повышается освещенность горизонтальной поверхности и южной стены, максимальные значения E_G и E_S отмечаются в околополуденное время. Северная стена освещается прямой радиацией в ранние утренние и поздние вечерние часы. Освещенность восточной и западной вертикальных поверхностей в утренние и вечерние часы летом в 2, а зимой в 3 раза превышают E_G (рис. 3 а, б). Небольшие различия в освещенности западных и восточных стен, характерные и для зимы, и для лета, могут быть связаны с особенностями дневного хода прозрачности атмосферы.

Освещенность вертикальной южной поверхности в летний период составляет около 2/3 от освещенности на горизонтальной поверхности (рис. 3 а). Зимой это соотношение меняется, освещенность южной стены в два раза превышает освещенность горизонтальной поверхности, поскольку поступление радиации на южную стену увеличивается из-за низкой высоты солнца (рис. 3 б).

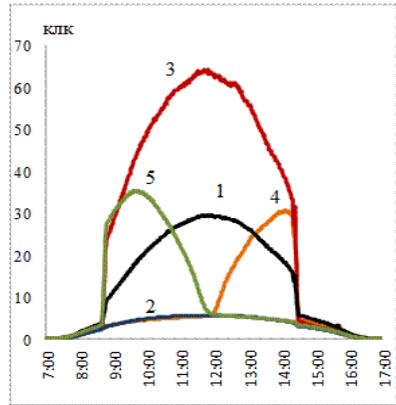
При пасмурной погоде освещенность всех четырех стен практически одинакова и не превышает 25—50 % от освещенности горизонтальной поверхности (рис. 3 в, г). Незначительные синхронные колебания освещенности для всех поверхностей связаны с изменением оптической плотности облаков.

В зимний период в пасмурную погоду освещенность как горизонтальной, так и вертикальных поверхностей на порядок ниже, чем летом за счет более короткого светового дня (рис. 3 б, в).

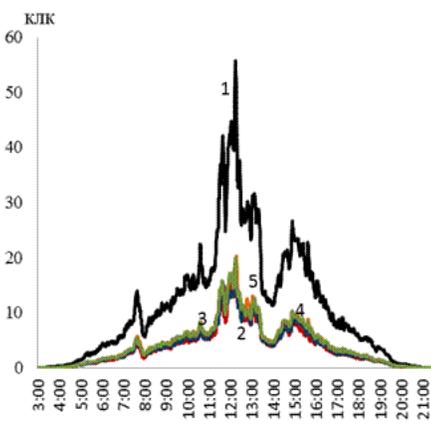
а)



б)



в)



г)

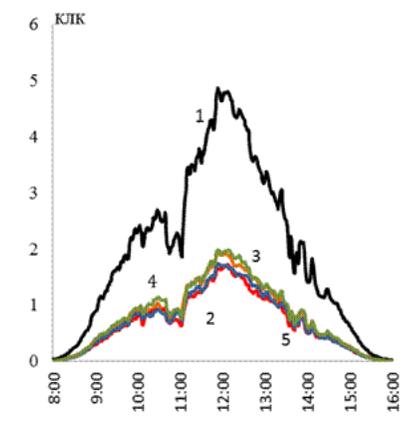


Рис. 3. Суточный ход естественной освещенности (по минутным данным):
на горизонтальной (1), северной (2), южной (3), западной (4) и
восточной (5) поверхностях:

а — лето, ясно; б — зима, ясно;

в — лето, пасмурно; г — зима, пасмурно.

Суточный ход освещенности стен различной ориентации может в реальных условиях (при переменной облачности) существенно отличаться от представленного на рис. 3.

В работах (Дарула, Киттлер, 2006; Соловьев, 2008) для расчетов естественной освещенности предложено использовать типизацию состояния небосвода, учитывающую положения солнечного диска и условия облачности. Полная реализация такого подхода затруднительна, так как учет реального распределения яркости по небосводу при всех возможных сочетаниях состояния облачного неба и солнечного диска практически невозможен. Однако полученные в течение четырех лет средние значения E_V позволили учесть все возможные для нашего региона условия, которые отражают освещенность стен разной ориентации при средних условиях облачности (рис. 4).

В летние месяцы освещенность северной стены имеет два максимума в утренние и вечерние часы. Отношение E_N/E_G в срок максимальных значений E_N меняется от 1,0 в летние месяцы до 0,5 в зимние. В середине дня величина E_V северной стены составляет всего около 12—17 % от E_G в теплое время года, увеличиваясь до 35 % в холодное. Абсолютные средние величины E_N в околополуденное время меняются от 2 клк·ч в декабре до 10—11 клк·ч в июле (рис. 4 а). Для южной стены, наоборот, освещенность максимальна в середине дня, при этом летние отношения E_S/E_G составляют 0,4—0,6, в холодное время они могут достигать 1,5. E_S в полдень в среднем изменяется от 10 клк·ч в декабре до 35—40 клк·ч летом (рис. 4 б).

Распределения освещенности восточной и западной стен практически симметричны друг относительно друга. Для западной стены летом в первой половине дня отношение E_W/E_G составляет 0,4—0,5 в ранние утренние часы, уменьшаясь до 0,15—0,20 к середине дня.

После полудня освещенность возрастает и может в среднем превышать величину горизонтальной освещенности в эти часы суток в 1,5—2 раза. Зимой E_W/E_G в среднем составляет 0,6—0,8. Абсолютные

значения E_w в околополуденные часы в среднем изменяются от 4 клк·ч в декабре до 10—12 клк·ч в середине лета, а в конце летнего дня E_w достигали 50 клк·ч (16—17 ч) (рис. 4 в).

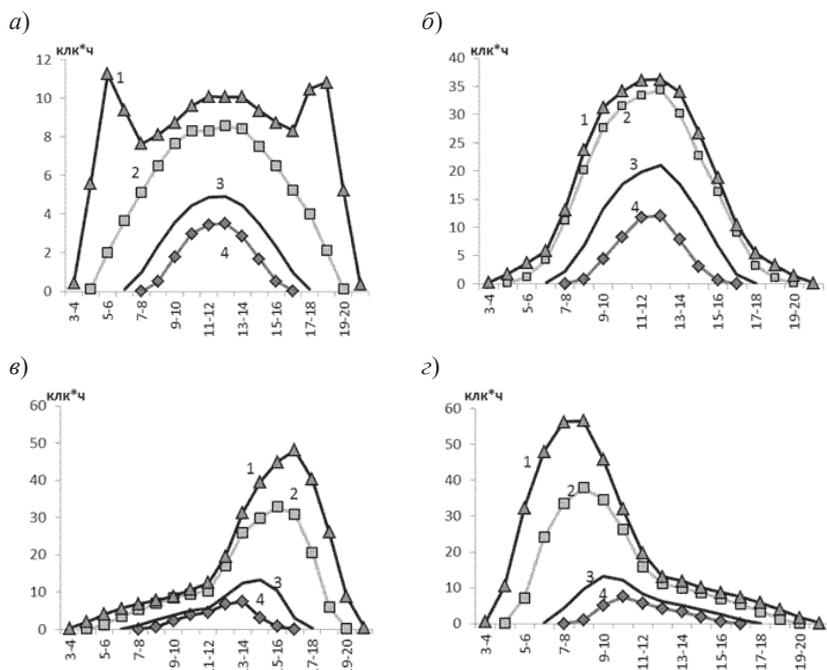


Рис. 4. Суточный ход естественной освещенности вертикальных поверхностей различной ориентации при средних условиях облачности:
 а — север, б — юг, в — запад, з — восток,
 в центральные месяцы года:
 1 — июль, 2 — апрель, 3 — ноябрь, 4 — январь.

Для восточной стены максимальные значения освещенности и значительное превышение количества освещения вертикальной стены по сравнению с горизонтальной освещенностью отмечаются в утренние часы. В это время уровень освещенности летом в среднем

составил 55 клк·ч (7—8 ч), уменьшаясь к полудню до 15 клк·ч. В декабре E_V восточной стены составлял всего 2—3 клк·ч в первой половине дня, уменьшаясь до 1 клк·ч и ниже в послеполуденное время (рис. 4 з).

Влияние всех факторов, формирующих световой режим, становится очевидным при анализе межсуточной изменчивости дневного количества освещенности ($\sum E_V$) стен различной экспозиции и горизонтальной поверхности. В течение года с увеличением высоты солнца $\sum E_V$ возрастает в 10—15 раз от декабря к июню. В среднем освещенность горизонтальных поверхностей больше, чем вертикальных, но в холодный период при низких высотах солнца в малооблачные дни максимальные дневные значения освещенности южной стены могут превышать максимальные значения $\sum E_G$ (табл. 1). В период коротких световых дней (ноябрь — февраль) наибольшая повторяемость $\sum E_V$ для всех стен лежит в пределах от 0 до 100 клк·ч, для горизонтальной поверхности — от 100 до 200 клк·ч. В летний период для северной стены наибольшая повторяемость смещается на градацию 100—200 клк·ч, для стен южной и западной экспозиций — от 300 до 400 клк·ч; для восточной стены — 400—500 клк·ч. Превышение освещенности восточной стены относительно западной в теплый период года объясняется развитием в течение дня кучевой облачности, которая достигает своего максимума после полудня. Минимальные дневные значения освещенности наблюдаются в дни со сплошной дождевой облачностью и осадками в течение всего дня. В такие дни суммарная освещенность формируется только рассеянным светом и разницы в $\sum E_V$ для стен всех экспозиций не наблюдается. Минимальные значения $\sum E_V$ для стен во все месяцы года близки между собой (табл. 1).

Межсуточная изменчивость $\sum E_V$ больше изменчивости $\sum E_G$, практически весь год коэффициент вариации превышает 50 %.

Освещенность горизонтальной и вертикальных поверхностей имеет четко выраженный годовой ход, определяемый возможной продолжительностью солнечного сияния, годовым ходом высоты солнца, облачности и альбедо подстилающей поверхности.

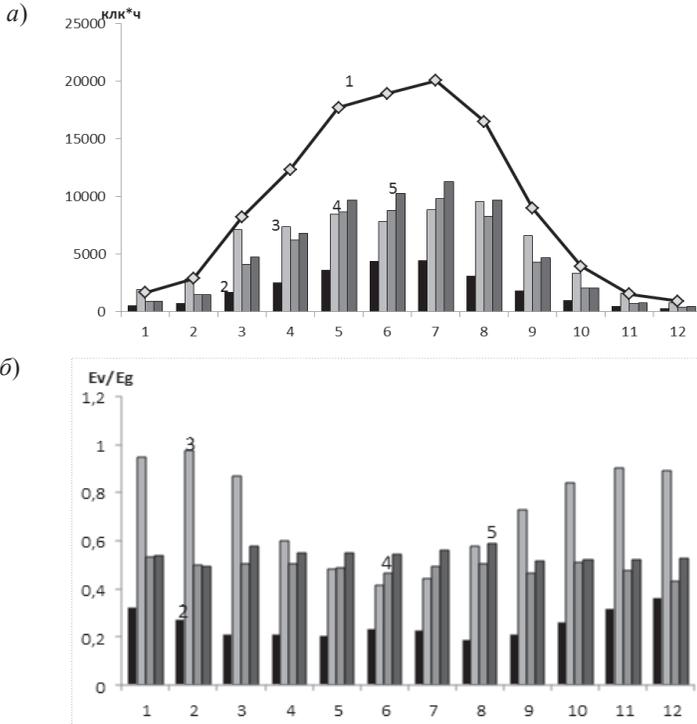


Рис. 5. Годовой ход месячного количества освещенности горизонтальной поверхности и различно ориентированных вертикальных поверхностей (а) и отношения E_v/E_g (б).

1 — горизонтальная поверхность;
 2 — поверхность, обращенная на север, 3 — на юг, 4 — на запад, 5 — на восток.

В соответствии с этими факторами максимальные значения для всех поверхностей отмечены в июле, минимальные — в декабре (рис. 5 а). Для стен южной ориентации в марте месячная сумма E_s выше, чем в июне, что определяется сочетанием высоты солнца и состоянием подстилающей поверхности.

В рассматриваемый период во все годы в марте наблюдался постоянный снежный покров, что, помимо значительного увеличения

отраженной освещенности от подстилающей поверхности (которое не измеряется прибором), ведет к многократному рассеиванию и повышению освещенности.

Годовой ход отношения E_V/E_G отличается от годового хода абсолютных значений освещенности. В течение всех месяцев года месячное значение освещенности горизонтальной поверхности превышает освещенность вертикальных поверхностей, среднее значение отношения E_V/E_G меньше единицы (рис. 5 б). Однако в зимние месяцы, когда преобладает ясная погода, отношение E_S/E_G становится больше единицы. Например, в малооблачном январе 2014 года продолжительность солнечного сияния составляла 74 % от возможной, и отношение E_S/E_G достигло своего наибольшего значения — 1,5.

Таблица 2

Годовые количества освещения суммарным светом горизонтальной и вертикальных различно ориентированных поверхностей (Млк·ч)

Горизонтальная поверхность	Вертикальные поверхности:			
	север	юг	запад	восток
120	25	74	61	62

Для стен восточной, западной и северной ориентаций годовой ход E_V/E_G практически отсутствует, для южной поверхности в годовом ходе отмечается максимум в зимние месяцы. Среднее годовое количество естественного освещения вертикальных стен любой ориентации меньше, чем горизонтальной поверхности (рис. 6).

Выводы

В результате выполненной работы получены средние оценки освещенности вертикальных поверхностей, ориентированных на север, юг, запад и восток при различных условиях облачности.

Суточный и годовой ход освещенности вертикальных поверхностей определяется соотношением ее прямой и рассеянной составляющих, которое зависит от астрономических факторов, а также от облачности и прозрачности атмосферы.

В ясные дни различия освещенности каждой из поверхностей велики. При средних условиях облачности сохраняются особенности освещенности стен различной экспозиции, отмеченные при ясном небе. При сплошной облачности освещенность всех четырех стен практически одинакова и меньше освещенности горизонтальной поверхности. В годовом ходе максимальная освещенность всех стен наблюдается в июне, минимальная — в декабре.

Зимой в ясные дни освещенность южной стены в полуденные, восточной в утренние, а западной в вечерние часы превышает освещенность горизонтальной поверхности. В весенние и летние месяцы освещенность восточных стен больше, чем западных, а зимой и осенью таких различий практически нет. Освещенность северных стен осуществляется в большей степени рассеянным светом, прямая составляющая наблюдается только утром и вечером в теплый период года.

Отношение освещенности вертикальных поверхностей к горизонтальной при средних условиях облачности для южной стены имеет четко выраженный годовой ход с максимумом в зимние месяцы. Для стен восточной, западной и северной ориентаций годовой ход E_v/E_G практически отсутствует.

В целом за год количество освещенности вертикальных стен любой ориентации меньше, чем горизонтальной поверхности. Освещенность северных стен составляет только 20 %, южной — 60 %, западной и восточной чуть больше 50 % от освещенности горизонтальной поверхности.

Результаты проведенных исследований позволяют более рационально использовать световые ресурсы при разработке критериев в строительстве и архитектуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дарула С., Киттлер Р. (2006). Метод расчета естественного освещения и современные тенденции оценки естественного света // Светотехника. № 1. С. 28—34.

Евневич Т. В., Никольская Н. П. (1968). Некоторые характеристики наружной освещенности в Москве // В сб.: Естественное освещение и инсоляция зданий. — М.: Изд. литературы по строительству. С. 11—23.

СНИП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. — М., Минстрой России, 1995 50с

СНИП II-4-79. Строительные нормы и правила. — М.: Стройиздат, 1980. 48 с.

Соловьев А. К. (2008). Распределение яркости по небосводу и его учет при проектировании естественного освещения зданий // Светотехника. № 6. С. 18—22.

Шиловцева О. А. (2014). Многолетние изменения естественной освещенности земной поверхности в Москве // Труды ГГО. Вып. 572. С. 100—122.

Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2015 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ (2016) / Под ред. О. А. Шиловцевой. — М.: МАКС Пресс. 268 с.

К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРОПОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ «ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ»

Л. В. Кашлева¹, М. Е. Баранова¹, Ю. П. Михайловский²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр. 98,
e-mail: kashleval@yandex.ru

²Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194036 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д.7
e-mail: 9217748675@yandex.ru

Поступила в редакцию 3.03.2018

Поступила после доработки 27.04.2018

Введение

Как известно, в атмосфере существует электрическое поле, создаваемое зарядами земли и атмосферы, которое характеризуется напряженностью (E). В условиях «хорошей погоды» (при отсутствии осадков, туманов, гроз, нижней облачности и сильных ветров) измерения напряженности электрического поля E свидетельствуют о том, что поверхность земли заряжена отрицательно, а атмосфера — положительно. Значение E_0 у поверхности Земли составляет около 100 В/м.

В электрическом поле атмосферы, в составе которой всегда есть ионы, течет ток проводимости. Электрическая активность процессов в атмосфере может быть охарактеризована не только напряженностью электрического поля, но и другими атмосферно-электрическими параметрами: плотностью электрического тока проводимости атмосферы, в результате чего осуществляется перенос положительного заряда на землю, плотностью электрического заряда и концентрацией ионов в атмосфере.

Вопрос о происхождении электрического поля атмосферы остается одним из наиболее сложных вопросов в исследованиях атмосферного

электричества. Первые теоретические гипотезы появились почти 100 лет назад. Выдвинутая Вильсоном (1920 г.) гипотеза о грозовом генераторе атмосферного электричества в настоящее время является общепризнанной. В соответствии с современной концепцией Глобальной электрической цепи (ГЭЦ) атмосферы (см. Мареев, Трахтенгерц, 2007; Морозов, 1991), совокупный заряд, переносимый одновременно молниями всех гроз на земном шаре, заряжает поверхность земли отрицательно. Так как верхняя часть большинства грозовых облаков имеет положительный заряд, потенциал ионосферы также оказывается положительным. При упрощенном описании глобальную электрическую цепь (ГЭЦ) представляют следующим образом. Земная поверхность и ионосфера, обладая высокой проводимостью (на 10—12 порядков выше проводимости воздуха в нижней тропосфере), играют роль обкладок сферического конденсатора, заряжаемого грозовыми разрядами. Возникающая между обкладками разность потенциалов является причиной формирования электрического поля атмосферы. Физической причиной формирования ГЭЦ в атмосфере служат низкая проводимость воздуха в нижней тропосфере и резкий рост проводимости воздуха с высотой (Мареев, Иудин, 2007). Одним из подтверждений концепции ГЭЦ является «унитарная вариация»: наблюдаемая над океанами, в полярных районах и в континентальных областях, удаленных от источников загрязнения, суточная вариация E_0 в виде простой волны с максимумом, одновременным для всего земного шара. Количественный анализ суточного распределения молниевых всплесков по поверхности земного шара показал, что период максимальной грозовой активности согласуется максимумом «унитарной вариации».

Очевидно, представляют интерес ответы на вопросы, как меняются с высотой электрические характеристики атмосферы и как формируется объемный заряд тропосферы. С этой целью были проведены расчеты электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды».

1. Описание модели

Основные допущения

Напряженность электрического поля атмосферы (Чалмерс, 1974) у поверхности земли E_0 задается выражением $E_0 = \frac{V}{\lambda R}$, где V — потенциал ионосферы, λ — проводимость воздуха вблизи земной поверхности, R — сопротивление вертикального столба атмосферы единичного сечения. В общем случае вариации определяются вариациями всех трех величин, из которых наибольшим изменениям подвержено значение λ , в хорошую погоду зависящее от времени суток.

1. Время релаксации электростатических процессов в атмосфере значительно меньше 1 ч (Чалмерс, 1974; Тверской, 1964). Поэтому для анализа применен принцип квазистатичности и разработана электростатическая модель тропосферы в условиях «хорошей погоды».

2. Перенос зарядов в тропосфере целиком обусловлен проводимостью атмосферного воздуха. Это позволяет использовать закон Ома для вертикального столба атмосферы.

3. Вертикальный градиент напряженности электрического поля атмосферы в областях «хорошей погоды» значительно больше горизонтального градиента. Это позволяет использовать для анализа одномерную модель.

4. Электрическое поле атмосферы является результатом разности потенциалов земной поверхности и ионосферы, но в тропосфере сосредоточен объемный заряд, частично компенсирующий заряд земной поверхности.

Основные уравнения

1) В модели атмосфера представляет собой конденсатор, нижняя обкладка которого — земная поверхность — заряжена отрицательно, изменение вертикальной составляющей напряженности

электрического поля с высотой является следствием существования положительного объемного заряда атмосферы.

Для анализа в условиях «хорошей погоды» использована одномерная модель электрической структуры атмосферы, для которой рассчитаны вертикальные профили следующих параметров:

- напряженности электрического поля, E_z ,
- проводимости атмосферы, λ_z ,
- концентрации ионов, их подвижностей, $(n_+)_z, (n_-)_z, (k_+)_z, (k_-)_z$,
- плотности объемного заряда атмосферного воздуха, ρ_z ,
- объемного заряда вертикального столба атмосферы единичного сечения от поверхности земли до уровня z , $Q_{\text{атм},z}$,
- плотности поверхностного заряда Земли, σ_3 .

Расчеты проводились как для наиболее чистых арктических или океанических регионов, так и для континентальных регионов.

В расчетах использованы следующие уравнения:

- 1) В соответствии с исследованиями В. Н. Морозова (1991) вертикальный профиль напряженности электрического поля представлен следующим образом для океанических регионов:

$$E_z = E_0 \exp(-\alpha z),$$

для континентальных регионов:

$$\text{при } z < h \quad E_z = E_0 \exp(-\alpha_1 z),$$

$$\text{при } z \geq h \quad E_z = E_h \exp(-\alpha_2 z),$$

где: E_z — напряженность поля на высоте z ,

$\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ — скорость убывания поля: для океанических регионов α изменяется в диапазоне $0,25-0,4 \text{ км}^{-1}$, для континентальных районов $h = 1,5-3 \text{ км}$, $\alpha_1 = 1,0 \text{ км}^{-1}$, $\alpha_2 = 0,4-0,5 \text{ км}^{-1}$.

- 2) Плотность электрического тока проводимости атмосферы, i_z , не меняется с высотой ($i_z = \text{const}$) и равна плотности электрического тока проводимости атмосферы у поверхности Земли на высоте 1 м (Тверской, 1964).

$$i_0 = \lambda_0 \cdot E_0, \quad (1)$$

3) Проводимость атмосферного воздуха, λ , равна сумме полярных проводимостей, λ_+ и λ_- :

$$\lambda = \lambda_+ + \lambda_-, \quad (2)$$

и может быть рассчитана по формуле

$$\lambda_z = \frac{i}{E_z} \quad (3)$$

4) Плотность объемного заряда атмосферного воздуха, при условии, когда эквипотенциальные поверхности параллельны горизонтальным поверхностям, определяется выражением:

$$\rho = -\varepsilon_0 \frac{dE}{dz}, \quad (4)$$

где: ε_0 — электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/(В·м), ε — диэлектрическая проницаемость воздуха.

Плотность объемного заряда атмосферного воздуха равна алгебраической сумме плотностей объемного заряда положительных и отрицательных ионов.

5) Средняя подвижность для отрицательных и положительных ионов k определяется при использовании данных зондирования атмосферы (Тверской, 1964), по формуле:

$$k(T, P) = k(T_0, P_0) \frac{P_0}{P} \frac{T}{T_0}, \quad (5)$$

где: T_0, P_0 — температура (°К) и давление (Па) на уровне z_0 ;
 T, P — температура и давление на уровне z_i .

Согласно лабораторным исследованиям подвижность положительных легких ионов в чистом воздухе у земли $k_{+,0} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, подвижность отрицательных легких ионов $k_{-,0} = 1,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. В работе выдвинуто предположение, что отношение (k_- / k_+) зависит от плотности воздуха.

Для уровня $z = 0$ значение средней подвижности ионов

$$k_0 = (k_{+,0} + k_{-,0})/2.$$

6) Концентрации положительных (n_+) и отрицательных (n_-) ионов, рассчитывается при использовании значения плотности объемного заряда атмосферного воздуха и формул для полярных проводимостей:

$$\lambda_+ = n_+ k_+ e \quad \text{и} \quad \lambda_- = n_- k_- e \quad (6)$$

7) Плотность поверхностного заряда земной поверхности, σ_3 , определяется по формуле:

$$\sigma_3 = \varepsilon \varepsilon_0 \cdot E_0 \quad (7)$$

где: E_0 — напряженность электрического поля атмосферы у поверхности земли.

Исходные данные

В качестве исходных данных использованы: универсальная суточная вариация напряженности электрического поля (Морозов, 1991) и типичный суточный ход полярных проводимостей атмосферы (Шварц и др., 1987) по данным измерений в Воейково, проводимых с интервалом 1 ч, а также данные вертикального профиля температуры воздуха и давления стандартной атмосферы.

Граничные условия

Расчеты проводились для вертикального столба атмосферы единичного сечения. На нижнем уровне z_0 все параметры определяются исходными данными. Верхняя граница области расчета

z_H определяется следующим образом. В соответствии с (Михайловский, 2014), точность измерения напряженности электрического поля атмосферы с помощью СПНП, установленного на самолете, составляет 5 В/м. Расчеты проводились до высоты z_H , на которой $E_z = 1,0$ В/м.

Шаг по времени составил 1 ч, шаг по высоте $dz = 100$ м.

Плотность объемного заряда атмосферного воздуха определяется по формуле (4); используется явная двухслойная схема с трехточечным шаблоном:

$$\rho_i = \frac{E_{i-1} - E_{i+1}}{2\Delta z}$$

Расчеты осуществляются для слоя от $z = 100$ м ($i = 2$) до z_H ($i = N$). На уровне z_0 плотность объемного заряда атмосферного воздуха рассчитывается по значениям напряженности электрического поля атмосферы у поверхности земли (E_0) и на уровне 25 м.

Объемный заряд слоя атмосферы от уровня земли до уровня z_H $Q_{атм,z}$ рассчитывается по формуле:

$$Q_{атм,z} = \sum_{i=2}^{i=N} \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2} dz. \quad (8)$$

2. Результаты расчетов

На рис. 1 представлен суточный ход параметров атмосферного электричества у земной поверхности:

— вертикальная составляющая напряженности электрического поля (E_0) и проводимость атмосферы λ_0 ($\lambda_0 = \lambda_{+0} + \lambda_{-0}$) — по данным наблюдений (Морозов, 1991, Шварц, и др., 1987),

— рассчитанные значения плотности электрического тока проводимости атмосферы (i) и поверхностная плотность заряда земной поверхности (σ_3).

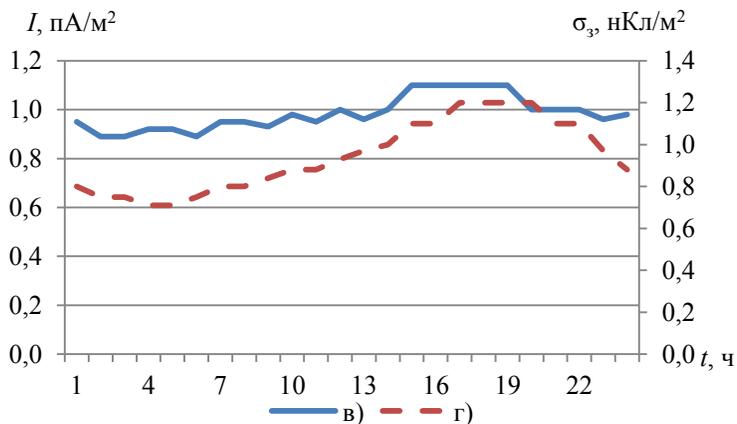
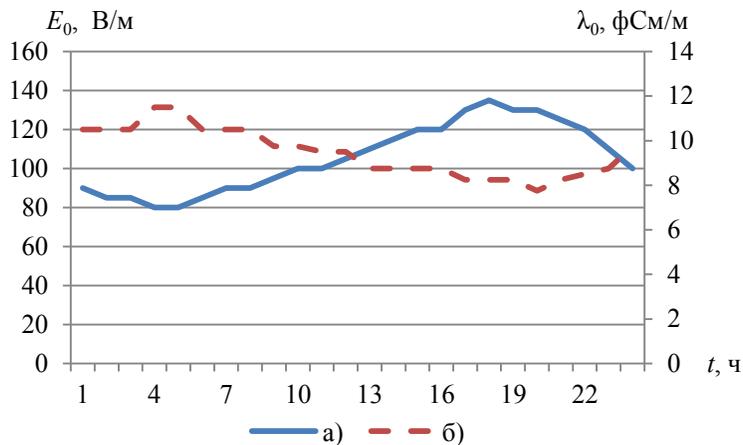


Рис. 1. Суточный ход параметров атмосферного электричества у земной поверхности:

- а) вертикальная составляющая напряженности электрического поля (E_0),
- б) проводимость атмосферы (λ_0),
- в) плотность электрического тока проводимости атмосферы (i),
- г) и плотность поверхностного заряда (σ_3) земной поверхности.

Явно выражена «унитарная вариация»: максимальное значение $E_0 = 135$ В/м в 18 ч, минимальное значение $E_0 = 80$ В/м в 4 ч. Суточные колебания напряженности электрического поля относительно среднего значения составляют 55 В/м.

Суточное изменение напряженности электрического поля у земли согласуется с изменением плотности поверхностного заряда. На рис. 1 показано, как в течение суток изменялись значения σ_3 : от $\sigma_3 = 0,71$ нКл/м² в 4 ч до $\sigma_3 = 1,2$ нКл/м² в 18 ч.

Напряженность электрического поля атмосферы убывает с высотой по экспоненциальному закону (Морозов, 1991). На рис. 2 показаны результаты расчета вертикального профиля напряженности электрического поля в 18 ч, над океаном и над сушей. Над океаном уровень $H1$, где $E_z = 1$ В/м, расположен на высоте 10,7 км, над сушей — на высоте 4,7 км; уровень $H5$, где $E_z = 5$ В/м расположен над океаном на высоте 8,3 км, над сушей — 3,3 км.

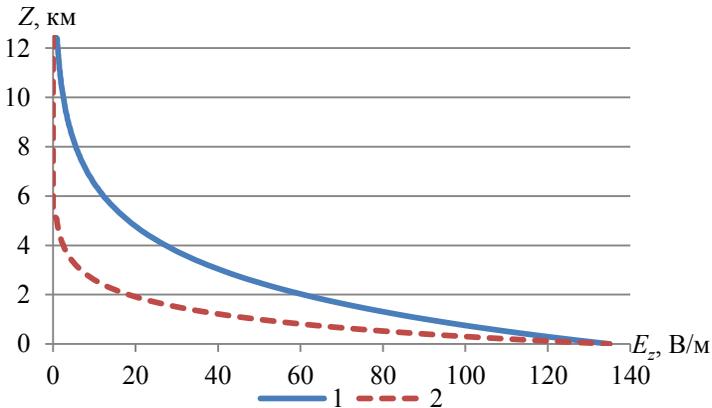


Рис. 2. Вертикальный профиль напряженности электрического поля E_z над океаном и над сушей в 18 ч.
1 — океан, 2 — суша.

Протяженность слоя атмосферы $H1$ от земной поверхности до уровня, где $E_z = 1$ В/м, меняется в зависимости от напряженности поля

у земли. На рис. 3 показан суточный ход верхней границы слоя $H1$ над сушей и над океаном. Наибольшая высота над сушей составляет 5,1 км, над океаном — 12,4 км, наименьшая высота над сушей — 4,5 км, над океаном — 1,1 км. Именно в этом слое накоплен основной объемный электрический заряд тропосферы.

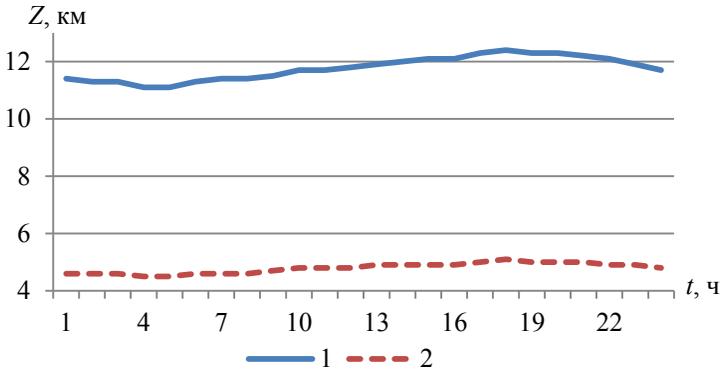


Рис. 3. Суточный ход высоты уровня $H1$, на котором вертикальная составляющая напряженности электрического поля $E_z = 1$ В/м, 1 — океан, 2 — суша.

Причина изменения напряженности электрического поля с высотой — формирование объемного заряда тропосферы. Об этом свидетельствуют результаты расчетов, представленные на рис. 4 и 5. В вертикальном столбе атмосферы единичного сечения от поверхности земли до уровня $H1$ накоплен заряд ($Q_{атм,z}$): над сушей $1,19 \cdot 10^{-9}$ Кл/м², что составляет 99 % от плотности поверхностного заряда земли, над океаном — $1,18 \cdot 10^{-9}$ Кл/м² и 98 % соответственно.

Большой интерес представляет изменение проводимости атмосферы и концентрации ионов в атмосфере.

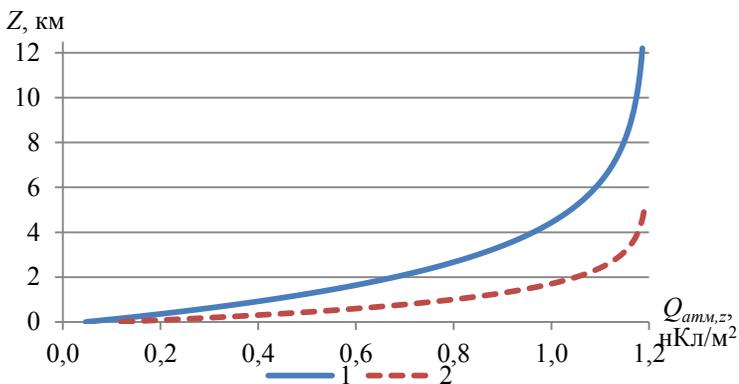


Рис. 4. Заряд $Q_{atm,z}$, накопленный в вертикальном столбе единичного сечения в слое атмосферы, от земной поверхности до уровня z .
1 — океан, 2 — суша.

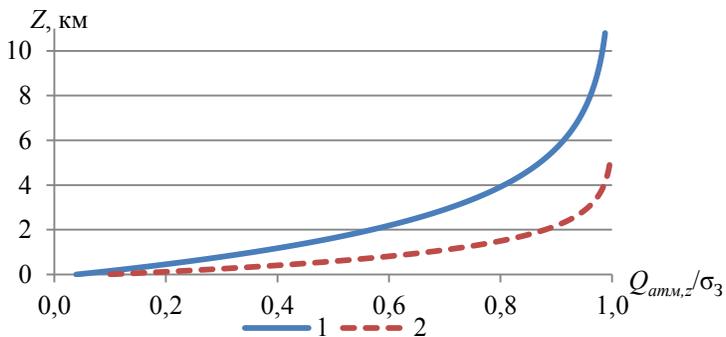


Рис. 5. Изменение с высотой отношения заряда, накопленного в атмосфере, $Q_{atm,z}$, к плотности поверхностного заряда земли, (σ_3), для суши и океана.
1 — океан, 2 — суша.

На рис. 6 вертикальный профиль проводимости атмосферы над океаном и сушей в 18 ч. Видим, что проводимость у поверхности земли составила 8,25 фСм/м, на высоте, где $E_z = 1$ В/м, она достигла 1150 фСм/м, т. е. возросла больше, чем на 2 порядка.

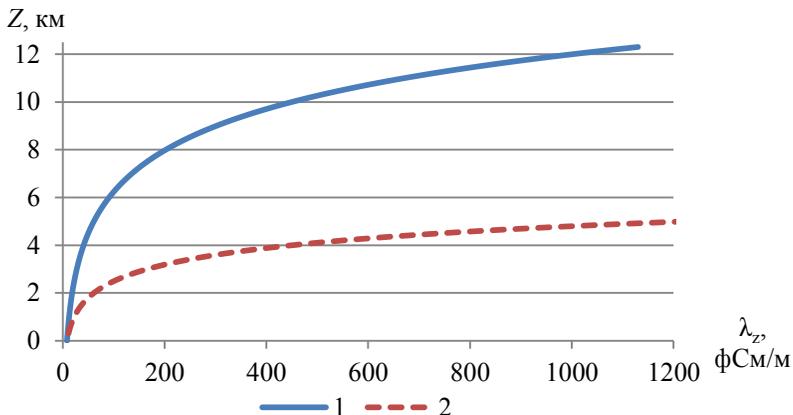


Рис. 6. Вертикальный профиль проводимости атмосферы λ_z над океаном и сушей в 18 часов.
1 — океан, 2 — суша.

На рис. 7 и 8 представлены вертикальные профили концентрации положительных и отрицательных ионов и суммарная концентрация ионов, над сушей и над океаном. Концентрации положительных n^+ и отрицательных n^- ионов различаются 0,01 %. На графике их вертикальные профили практически совпадают (представлены линией n^+). Концентрация ионов в слое от поверхности земли до уровня, где $E_z = 1$ В/м (на этом уровне λ_z равна 1150 фСм/м) увеличивается на 2 порядка над сушей и в 50 раз над океаном. Различия в значениях концентрации ионов над сушей и над океаном можно объяснить тем, что проводимость воздуха определяется концентрацией ионов и их подвижностью. С высотой подвижность ионов возрастает. При заданном значении проводимости атмосферы большей подвижности ионов соответствует меньшее значение их концентрации.

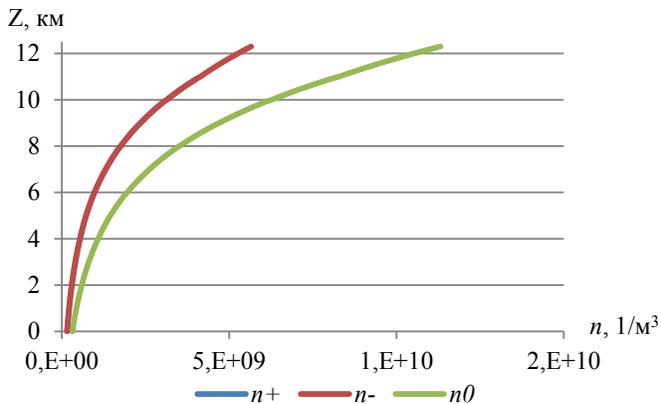


Рис. 7. Вертикальный профиль концентрации n положительных n_+ , отрицательных n_- и суммарная концентрация n_0 ионов над океаном.

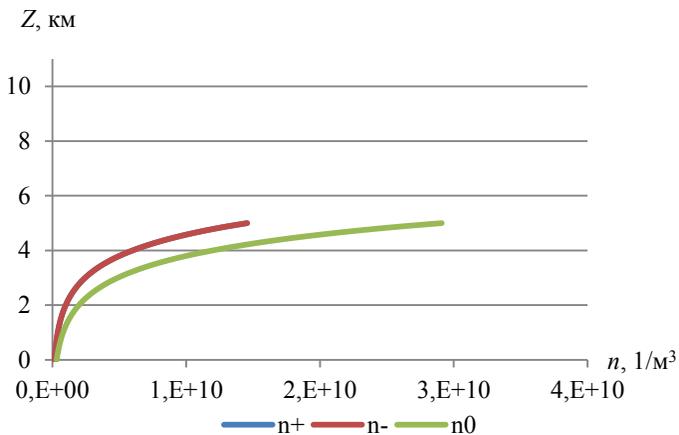


Рис. 8. Вертикальный профиль концентрации n положительных n_+ , отрицательных n_- и суммарная концентрация n_0 ионов над сушей.

Выводы

Представленные результаты являются попыткой описать процесс формирования электрической структуры тропосферы в условиях «хорошей погоды». Проведенные расчеты согласуются с имеющимися данными, представленными в литературе (Анисимов, Мареев, 2008; Морозов, 1991). Это позволяет использовать предложенную модель для построения профилей электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды».

Выполненные расчеты показали, что в тропосфере существует объемный заряд атмосферы, более чем на 95 % компенсирующий заряд земной поверхности. Причина появления заряда атмосферы — низкая проводимость воздуха в нижней тропосфере и резкий рост проводимости воздуха с высотой. При этом в загрязненных регионах уровень, на котором скомпенсировано более 95 % заряда земной поверхности, расположен ниже 5 км, в чистых регионах (над акваториями и в Арктике) — около 10 км. Этот вывод относится к регионам, удаленным от береговой зоны. В прибрежных районах из-за горизонтального перемешивания толщина слоя «компенсации» заряда земной поверхности зависит от интенсивности перемешивания. В верхней тропосфере проводимость атмосферного воздуха возрастает в десятки раз по сравнению проводимостью у земной поверхности. Возможно, в верхней тропосфере грозовые разряды могут происходить при более низких значениях напряженности электрического поля, чем под облаком.

Дальнейшие исследования позволят проанализировать процессы формирования заряда облачной атмосферы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов С. В., Мареев Е. А. (2008). Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. № 10. С. 8—18.

Имянитов И. М., Чубарина Е. В. (1965). Электричество свободной атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат. 296 с.

Кашлева Л. В. (2008). Атмосферное электричество. Учебное пособие. — СПб: РГГМУ. 116 с.

Мареев Е. А., Трахтенгерц В. Ю. (2007). Загадки атмосферного электричества // Природа. № 3. С. 24—33.

Михайловский Ю. П. (2014). О технологии контроля напряженности электрического поля атмосферы и облаков с помощью самолетов-лабораторий // Методы и устройства передачи и обработки информации. № 16. С. 41—45.

Морозов В. Н. (1991). Глобальная атмосферно-электрическая токовая цепь / В справочнике «Атмосфера» — Л.: Гидрометеоиздат. С. 395—408.

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

Тверской П. Н. (1962). Курс метеорологии (физика атмосферы). Атмосферное электричество. — Л.: Гидрометеоиздат. 698 с.

Чалмерс Дж. Л. (1974). Атмосферное электричество. — Л.: Гидрометеоиздат, 420 с.

Шварц Я. М., Огуряева Л. В. (1987). Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // Метеорология и гидрология. № 7. С. 59—64.

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПОСТАВЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ И НАЗЕМНОЙ ИНФОРМАЦИИ

*М. В. Жарашуев, А. Х. Гергоков, А. Х. Кагермазов, В. С. Макитов,
Л. Т. Созаева*

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, Ленина проспект, д. 2
E: mail: mgk777@mail.ru

Поступила в редакцию 5.06.2017
Поступила после доработки 3.08.2017

Введение

В последнее время возрастает потребность в качественном метеообеспечении различных отраслей экономики. С развитием техники и технологий расширяются возможности сравнения метеорологических характеристик, измеренных различными средствами и системами измерений. Для автоматического сравнения радиолокационных данных сети «ДМРЛ–С» с данными наземной метеорологической сети была разработана программа «RadMet.exe», обеспечивающая автоматическое построение карты заданного региона (Северного Кавказа), на которую на фоне административных границ территории наносятся:

- пункты наблюдений (метеостанции);
- суммарное количество осадков по радиолокационным данным «ДМРЛ–С»;
- количество осадков за 12 и 24 ч по данным метеостанций.

Программа «RadMet.exe» опрашивает 93 страницы официального сайта Гидрометцентра РФ <http://meteoinfo.ru>, с которого выбирает полусуточные и суточные суммы осадков в 06 и 18 ч ВСВ. Эта

информация сохраняется в базе данных. При поступлении радиолокационной информации осуществляется наложение радиолокационных данных на данные пунктов наблюдений за соответствующий срок.

Целью данной работы является сравнение радиолокационных данных и данных метеостанций, оценка факторов определяющих расхождения в их показаниях и разработка методики сравнения этих данных.

1. Анализ выходных данных

Сравнительный анализ данных, полученных от метеостанций и локаторов «ДМРЛ–С», работающих в Ставрополе и Волгограде, выполнен по материалам за 2013 г.

Пример карт сравнения количества осадков, измеренных Волгоградским «ДМРЛ–С» и сетью метеостанций попавших в 200-километровую зону сканирования локаторов, приведен на рис 1. Как следует из этого рисунка, при общем согласии данных имеет место расхождение количества осадков, измеренных «ДМРЛ–С» (QR, mm) и метеостанциями (QM, mm).

Причинами таких расхождений, согласно (Абшаев и др., 2017), могут быть:

- a) погрешность измерения количества осадков на метеостанции;
- b) погрешность калибровки «ДМРЛ–С»;
- c) некорректный учет ослабления радиоволн в волноводном тракте, ветрозащитном укрытии, атмосферных газах, облаках и осадках;
- d) неопределенность используемого корреляционного соотношения $Z — I$;
- e) удаление радиолуча от поверхности земли и «перелет луча» над зоной осадков на больших удалениях;
- f) уширение радиолуча с расстоянием;
- g) аномальная рефракция радиоволн;

h) несовпадение времени и координат радиолокационных и наземных измерений сравнимого количества осадков, связанное со сбоем или несвоевременной передачей информации на сайт Гидрометцентра РФ ;

i) частичное закрытие углов обзора и др.

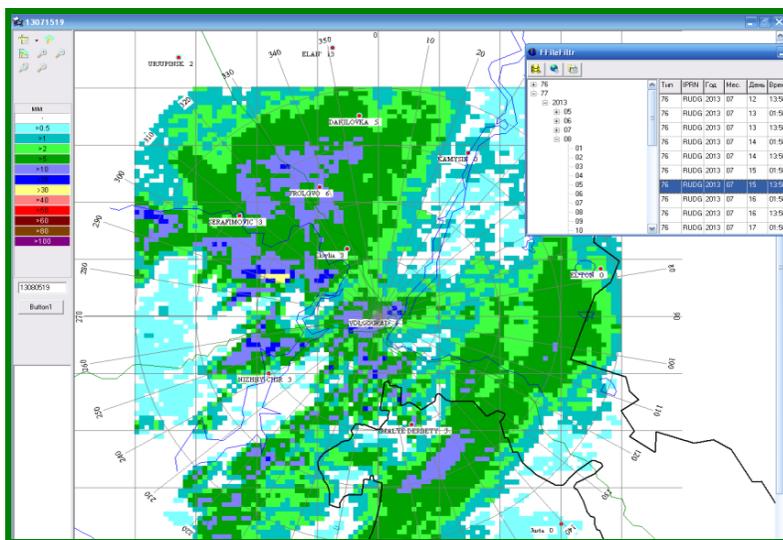


Рис. 1. Карта полусуточных осадков (с 00.00 до 12.00 UTC), выпавших в Волгоградской области 15 июля 2013 г.

Анализ возможного влияния этих причин показывает, что первые три причины а)—с) могут привести к систематическому расхождению значений QR и QM и погрешностям, которые определяются погрешностями определения константы (метеорологического потенциал) ДМРЛ и ослаблением радиоволн в ветрозащитном укрытии при выпадении осадков.

Суммарную систематическую погрешность при измерении осадков можно описать следующей формулой (ВМО, 2009), в которой погрешности перечислены в порядке значимости:

$$P_k = k_1 P_c = k (P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \pm \Delta P_4 + \Delta P_5), \quad (1)$$

где P_k — скорректированное количество осадков;

P_c — фактическое количество осадков, собранных в осадкосборном сосуде;

k_1 — коэффициент, учитывающий ветровой недоучет осадков;

P_g — измеренное количество осадков;

k — потери из-за деформации ветрового поля приемным отверстием осадкомера;

$(\Delta P_1 + \Delta P_2)$ — потеря осадков за счет смачивания внутренних стенок осадкосборного сосуда и его неполного опорожнения;

ΔP_3 — потери за счет испарения из осадкосборного сосуда;

ΔP_4 — разбрызгивание или забрызгивание;

ΔP_5 — надувание или выдувание снега.

Факторы, влияющие на потери по причине деформации ветрового поля над приемным отверстием осадкомера, можно разделить на (Инюхин, 2013):

- метеорологические — это скорость ветра над осадкомером во время выпадения осадков и микроструктура осадков;
- инструментальные, к которым относится форма, площадь приемного отверстия и толщина обода осадкомера и осадкомерного сосуда (они составляют от 10 до 50 % для снега и от 2 до 10 % для жидких осадков).

Причины d) — f) обычно приводят к снижению точности радиолокационного измерения осадков и нарастанию ошибок измерения с расстоянием.

Причина d) может привести к систематическим расхождениям, но при разумном выборе соотношения Z — I , они обычно меньше чем влияние причин, рассмотренных ниже.

Несовпадение времени и координат радиолокационных и наземных измерений сравниваемого количества осадков могут возникать из-за сбоев в передаче данных, а также вследствие ветрового переноса (особенно в случае локальных и неоднородных по площади ливневых осадков). Так, например, 1 августа 2013 г.

сравнение данных об полусуточных осадках (за 12 часов), предоставляемых метеостанциями на сайт Росгидромета в 19 ч и радара в 18 ч дает заметное расхождение, которое по пункту Городовиковск составляет 18,4 мм. Несколько меньшее расхождение обнаруживается при сопоставлении данных за 2 августа 2013 г. в 19 ч (по пункту Городовиковск оно составляет 15,8 мм).

Наличие углов закрытия обзора является причиной того, что в секторах закрытия радиолокатор не обнаруживает осадки. Это создает серьезные проблемы измерения осадков в горных районах, где почти неизбежно возникают углы закрытия приземного слоя, ограничивающие обзор. Например, Большой Ставропольский хребет высотой 300—600 м закрывает обзор ставропольского МРЛ-5 в западном и юго-западном направлении на $0,5—1,5^\circ$. Это приводит к серьезному занижению параметров облаков и осадков в этих направлениях, сокращению площади и интенсивности осадков, в том числе, и градовых. Это же наблюдается в секторах закрытия обзора деревьями, мачтами и другими сооружениями закрывающими обзор. Размещение МРЛ на вышках может решить эту проблему, но не всегда реализуемо из-за отсутствия коммуникаций. Кроме того, для обнаружения осадков в ближней зоне (в радиусе до 50 км) требуется обзор при углах ниже уровня горизонта.

Для получения статистических данных о корреляции радиолокационных и наземных данных о количестве осадков, точности радиолокационного измерения осадков и ее зависимости от расстояния проведен сравнительный анализ выходных данных программы «RadMet» за апрель—август 2013 г.

2. Корреляция радиолокационных и наземных данных

Результаты сопоставления полусуточного (за 12 часов) и суточного (за 24 часа) количества осадков, измеренного в пунктах наблюдений и в пунктах установки радиолокаторов ДМРЛ-С, в период с апреля по август 2013 г. приведены на рис. 2 и 3. В сравнениях использованы данные 20-и метеостанций в радиусе

обзора Ставропольского ДМРЛ-С (98 случаев осадков за 12 часов и 75 случаев осадков за 24 часа) и 11-и метеостанциям в радиусе обзора Волгоградского ДМРЛ-С (211 случаев осадков за 12 часов и 194 случая осадков за 24 часа).

Как следует из рис. 2 и 3, разброс значений Q_M и Q_R довольно существенный и коэффициент достоверности аппроксимации между ними не превышает 0,45. Связь количества осадков, измеренных локатором и метеостанциями, может быть представлена линейной зависимостью (тонкая пунктирная линия на рис. 2 и 3). Одной из причин расхождения Q_M и Q_R может быть погрешность, связанная, с систематическим недоучетом количества выпавших осадков при наблюдениях по осадкомеру (Инюхин, 2013).

Наряду со случайным разбросом, отмечается также и систематическое завышение количества осадков по радиолокационным данным. Для устранения этого завышения необходимо вводить коррекцию в константы обоих ДМРЛ (Абшаев и др., 2014):

на Ставропольском «ДМРЛ-С» значение константы следует повысить на 1,23 dB, установив значение $10\lg C_M = 277,91$ dB, вместо 276,58 dB;

на Волгоградском «ДМРЛ-С» следует повысить константу на 1,17 dB (Абшаев и др., 2017)

Точность радиолокационного измерения осадков с расстоянием снижается. Удаление радиолуча от поверхности земли вследствие различия кривизны радиолуча и поверхности земли приводит к тому, что даже при стандартной рефракции луч, с увеличением расстояния, все выше поднимается над поверхностью земли и на расстоянии более 150 км практически не охватывает зону осадков. Такой «перелет» радиолуча приводит к занижениям площади, интенсивности и количества осадков, размера и кинетической энергии града, нарастающим с расстоянием, а на расстоянии около 200 км осадки вообще могут не обнаруживаться. В случае слоисто-дождевых облаков луч может охватывать «яркую линию» таяния снега даже при нулевых углах сканирования, что приводит к завышению отражаемости от 5 до 16 dB и количества осадков до 5 раз.

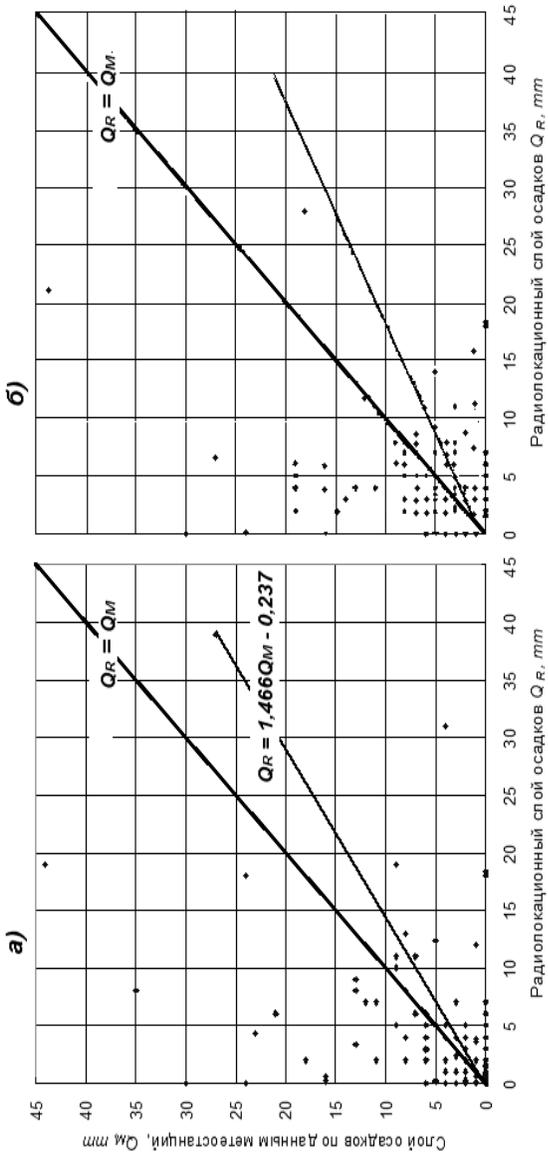


Рис. 2. Количество осадков за 24 часа:
 а) — по данным 20 метеостанций (Q_M) и данным Ставропольского «ДМРЛ-С» (Q_R);
 б) — по данным 11 метеостанций (Q_M) и Волгоградского «ДМРЛ-С» (Q_R).

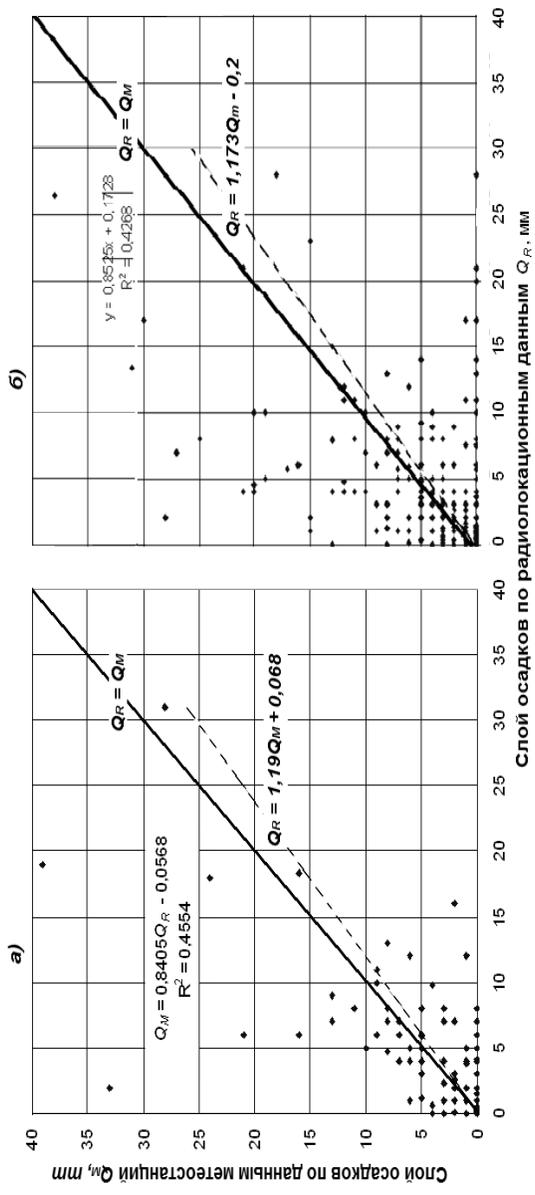


Рис. 3. Количество осадков за 12 часов:
 а) — по данным 20 метеостанций (Q_M) и данным Ставропольского «ДМРЛ-С» (Q_R);
 б) — по данным 11 метеостанций (Q_M) и Волгоградского «ДМРЛ-С» (Q_R).

Коэффициент заполнения радиолуча (KL), в связи с расширением радиолуча с расстоянием (Абшаев и др., 1980) KL, является функцией его ширины, расстояния и тангенциальных размеров цели, т. е. $KL = f(R, \theta, l)$. Обычно полагают $KL = 1$, но это справедливо только в случае обширных полей однородных осадков из слоисто-дождевых облаков и высоком уровне линии таяния снега. В случае кучево-дождевых облаков KL уменьшается с расстоянием, так как области высокой отражаемости могут не заполнять зондирующий объем. На удалении $R = 200$ км при $\theta = 1,0^\circ$ диаметр луча достигает 3,5 км, а при $\theta = 1,5^\circ$ — 5,2 км. Локальные максимумы отражаемости в случае грозоградовых облаков часто имеют поперечник меньше 3—5 км (Жарашуев и др., 2015), радиолуч охватывает области более низкой отражаемости и значение Z_{\max} может быть занижено на несколько dBZ (например, при $KL = 0,5$ на $10\lg KL = 3$ dB, а при $KL = 0,3$ на $10\lg KL = 5,2$ dB). Такое снижение отражаемости и интенсивности осадков нарастает с расстоянием, кроме того, «размазываются» градиенты отражаемости, занижаются высоты расположения повышенного радиоэха и т. д. Таким образом, допущение $KL = 1,0$ может быть одним из серьезных источников расхождений данных соседних ДМРЛ и погрешностей радиолокационных измерений осадков. Корректный учет этого фактора в зависимости от масштаба неоднородностей облаков, имеющих региональные различия, требует дальнейшей проработки.

Следует отметить, что погрешности измерения осадков, связанные с «перелетом» и расширением луча, закрытием обзора, охватом «яркой линии» таяния снега могут значительно превосходить погрешности, связанные с вариацией параметров A и b соотношения $Z = A\Gamma^b$. Для минимизации занижения количества осадков за счет «перелета» луча, а также исключения «дыр» над горами и за ними предлагается измерение осадков осуществлять в 1 км слое над уровнем основания радиоэха, а не в горизонтальном сечении приземного слоя.

Аномальная рефракция радиоволн, особенно суперрефракция, связанная с выхолаживанием приземного слоя атмосферы за счет

радиационных потерь почвы в безоблачные ночи, а также за счет испарения осадков, приводит к обнаружению радиоэха местных предметов ниже радиогоризонта (Абшаев и др., 2013). Без фильтрации аномального радиоэха они могут интерпретироваться как очаги осадков, гроз и даже града. Эти ложные очаги являются серьезной помехой при автоматизированных наблюдениях и могут стать причиной отображения большого слоя ложных осадков. Аномальная рефракция приводит также к искажению высот радиоэха.

Выводы

На данном этапе работы для оценки степени корреляции радиолокационных данных с данными метеостанций был выполнен полный и детальный анализ каждого конкретного случая, по результатам которого были установлены основные причины расхождений в показаниях наземных и радиолокационных данных:

— удаление радиолуча от поверхности земли с увеличением расстояния.

— изменение коэффициента заполнения радиолуча в связи с уширением радиолуча с расстоянием.

— аномальная рефракция радиоволн.

— наличие углов «закрытия».

Предложенный метод автоматического сравнения радиолокационных и наземных данных с использованием данных метеостанций, полученных из сети Интернет, позволяет в автоматическом режиме проводить контроль качества вторичной радиолокационной информации о количестве осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Малкарова А. М., Барекова М. В. (2014). Руководство по организации и проведению противогородовых работ. — Нальчик: ВГИ. С. 234.

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Гергоков А. Х., Чочаев А. Б., Геккиева Ж. М. (2017). Методы калибровки метеорологических радиолокаторов. Метеорология и гидрология. № 3. С. 114—121.

Абшаев М. Т., Бурцев И. И., Ваксенбург С. И., Шавела Г. Ф. (1980). Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. — Л.: Гидрометеиздат. С. 105—109.

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Гергоков А. Х. (2013). Фильтрация аномального радиоэха при радиолокационных наблюдениях облаков и осадков / В сб. Тезисы конференции молодых ученых ВГИ, посвященной 100-летию проф. Г. К. Сулаквелидзе. 22—23 мая 2013 г. С. 9—11.

Жарашуев М. В., Гергоков А. Х. (2015). Методика автоматической идентификации площадки засева градовых облаков. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2015. № 3 (187). С. 25—30.

Инюхин В. С., Макитов В. С., Суслов В. В. (2013). Сопоставительный анализ данных радиолокационных и наземных измерениях ливневых осадков // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. № 1 (51). С. 52—60.

Руководство по метеорологическим и методам наблюдений (1996) / ВМО-№ 8 Шестое издание. Часть I. Глава 6. — Женева.

УДК: 595.771.+578.833(470+571)

**ПОЯВЛЕНИЕ ЧУЖЕЗЕМНЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ВИДОВ
КОМАРОВ *Aedes* НА ЮГЕ РОССИИ — ОЦЕНКА РИСКА
ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И
ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

В. В. Ясюкевич^{1,2}, *Н. В. Ясюкевич*¹

¹ Институт глобального климата и экологии
имени академика Ю. А. Израэля
Росгидромета и РАН,
107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б,
v1959@yandex.ru

² Институт географии РАН,
109017 Москва, Старомонетный пер., 29

Поступила в редакцию 17.05.2017

Поступила после доработки 21.05.2017

Введение

Появление чужеземных (адвентивных) переносчиков возбудителей различных инфекций на территориях, где они раньше не встречались, представляет собой дополнительную угрозу здоровью населения. В России (Черноморское побережье Кавказа) были обнаружены желтолихорадочный комар *Aedes (Stegomyia) aegypti* L., 1762 и азиатский тигровый комар *Ae. (Stegomyia) albopictus* Skuse, 1894. Комары этих видов — переносчики многих арбовирусных инфекций, в том числе таких, как желтая лихорадка, лихорадки Денге, Чикунгунья, Зика (Тропические болезни, 1978; Львов и др., 1989; Тарасов, 2002; Ганушкина, Дремова, 2012; Ясюкевич и др., 2016). *Aedes aegypti* был широко распространен в первой трети XX века на территории СССР: на Черноморском побережье Кавказа и в Закавказье. Численность его была высока, и это представляло большую эпидемиологическую опасность. В результате предпринятых мер количество данного вида комаров в 1930—1940-е гг. стало резко

снижаться, а к началу 1950-х годов этот вид на территории СССР уже не регистрировался (Гуцевич. и др., 1970; Рябова и др., 2005).

Первичным ареалом *Ae. aegypti* является экваториальная Африка. С развитием мореплавания этот вид распространился по всем тропическим широтам Старого и Нового Света. Его распространение ограничивается территориями со среднемесячными изотермами января 10 °С в Северном полушарии и 10°С июля в Южном (Geographical distribution..., 1989).

В 2001 г. *Ae. aegypti* был вновь обнаружен в городе Сочи (Рябова и др., 2005). Позднее было показано, что это не случайная находка и этот вид продолжает распространяться по Черноморскому побережью (Юничева и др., 2008). Спустя 10 лет почти там же — пос. Хоста — был обнаружен *Ae. albopictus*, ранее на территории России не встречавшийся (Ганушкина и др., 2012). Первичный его ареал — тропики Юго-Восточной Азии и острова Океании. Развитие международного сотрудничества в области транспорта и торговли способствовали существенному его распространению, которое отмечается со второй половины XX века (Knudsen, 1995; Tatem et al., 2006). В настоящее время вторичный ареал *Ae. albopictus* включает страны Южной и Средней Европы, многие страны Южной, Центральной и Северной Америки, в том числе восточные и северо-восточные штаты США, Ближний Восток, Австралию и Новую Гвинею, ряд африканских стран (Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes..., 2012; <http://ecdc.europa.eu/en/healthtopics/vectors/mosquitoes/Pages/aedes-aegypti.aspx>; <http://ecdc.europa.eu/en/healthtopics/vectors/mosquitoes/Pages/aedes-albopictus.aspx>).

Такое стремительное распространение стало возможным благодаря тому, что яйца комаров *Aedes* (не только рассматриваемых в статье видов) способны длительное время сохранять жизнеспособность в сухом виде, тогда как для яиц представителей других родов кровососущих комаров (Culicidae) высыхание губительно (Гуцевич. и др., 1970).

Задача настоящей статьи состоит в оценке степени риска для здоровья населения России в связи с возможным

климатообусловленным распространением этих переносчиков в условиях настоящего и предполагаемого в будущем климата.

Материалы и методы

Методические вопросы, связанные со структурой и использованием климатической базы и моделированием ареалов, подробно рассмотрены в монографии С. М. Семенова с соавторами (2006). Карты, отображающие распространение рассматриваемых видов переносчиков, представлены в опубликованных нами ранее работах (Ясюкевич и др., 2013; Попов и др., 2013). Здесь мы ограничимся кратким описанием полученных там результатов, сосредоточившись на оценке риска для здоровья населения России, связанного с изменением климата, что в упомянутых работах не производилось.

Результаты и обсуждение

Оценка потенциального распространения *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus*

Несмотря на то, что это уже было описано нами (Ясюкевич и др., 2013), для облегчения восприятия нижеследующего материала следует сказать о выборе климатических предикторов для картографического анализа. Яйца *Ae. aegypti* не диапаузируют и не переносят низких температур, поэтому фактором, лимитирующим распространение этого вида, является среднемесячная температура января 0 °С. Яйца *Ae. albopictus* зимуют, в отличие от *Ae. aegypti*, в состоянии диапаузы и переносят легкое промораживание. Пределом их распространения считается среднемесячная температура января -1°С...-3°С. Некоторый разброс связан, скорее всего, с популяционными различиями. Так, в Японии популяции этого вида стабильно существуют и при -2°С, в Южной Корее — при -3°С. Другим ограничивающим климатическим фактором является среднегодовая сумма осадков не менее 450 мм (Ганушкина, Дремова, 2011; Kobayashi

et al., 2002, 2008; Neteler et al., 2011; Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes..., 2012).

На основе этих климатических предикторов был проведен анализ возможности распространения этих видов на территории России, стран СНГ и Балтии при климатических условиях периода 2000—2010 гг. Укоренение *Ae. aegypti* в настоящее время возможно на Черноморском побережье Кавказа до широты Краснодара, а также на всей территории Крыма.

В силу особенностей биологии *Ae. albopictus* способен распространиться существенно далее в глубь территории России, чем *Ae. aegypti*. Если принять за границу распространения январскую изотерму -1°C , то на Черноморском побережье Кавказа он продвинется несколько севернее, чем *Ae. aegypti*, заселит также Крым. Пригодными окажутся также небольшие участки Каспийского побережья Дагестана. За пределами России возможна акклиматизация *Ae. albopictus* на крайнем юге Молдовы и Черноморском побережье Украины до Одессы, а также Прикаспийской части Азербайджана и восточном побережье Каспия южнее залива Кара-Богаз-Гол (Туркменистан).

Исходя из предположения, что были завезены комары из наиболее холодостойкой популяции (оценка по январской изотерме -3°C), то в потенциальную область его распространения войдет Северный Кавказ, Краснодарский и Ставропольский края, Калининградская область и прилегающие районы Литвы, Закавказье (кроме высокогорных районов), южные области Украины, почти вся территория Молдовы, обширные участки восточного побережья Каспия к югу и северу от залива Кара-Богаз-Гол (Туркменистан). Возможно также его укоренение в Киргизии (Ясюкевич и др., 2013).

В настоящее время *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus* на территории России встречаются на участке Черноморского побережья Кавказа от пос. Джубга до границы с Абхазией, а на территории Абхазии до Сухуми. В глубине территории от побережья обнаружен только *Ae. albopictus* — в поселке Красная Поляна (44 км, 600 м над уровнем моря) (Юничева и др., 2008; Ганушкина и др., 2013, 2014) (рис. 1).

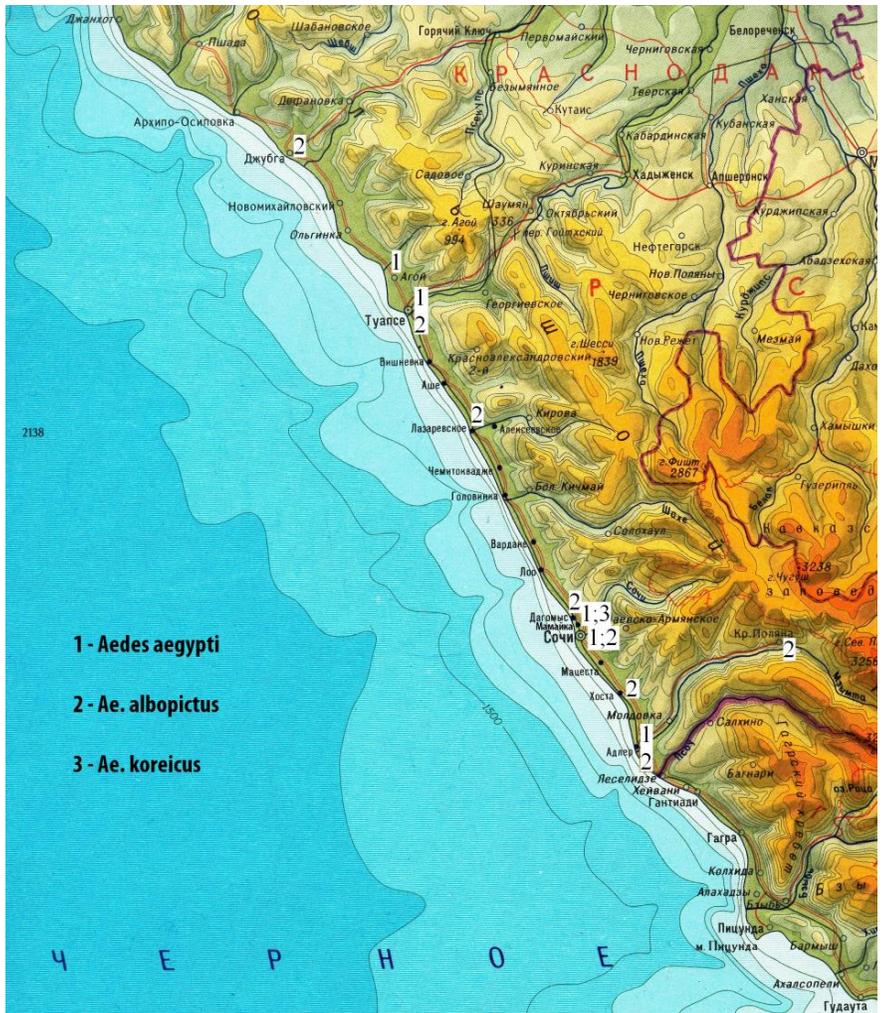


Рис. 1. Распространение адвентивных видов *Aedes* на Черноморском побережье Кавказа.
 Карта составлена по данным (Ganushkina et al., 2016).
 Картографическая основа (Атлас СССР, 1986)

Таким образом, климатические предпосылки к распространению этих видов по территории России, существующие в настоящее время, не реализованы.

На этой же карте отмечена первая находка адвентивного для Европейской части России вида *Aedes (Finlaya) koreicus* Edwards, 1917 (Безжонова и др., 2014). Этот вид распространен в Приморском крае, существенного эпидемиологического значения не имеет (считается потенциальным переносчиком вируса японского энцефалита и диروفилариозов).

Безусловно, горный рельеф будет препятствовать естественному распространению этих видов комаров путем разлета. Нельзя не принимать во внимание участие в этом процессе человека. Мы склонны предполагать, что в Красную Поляну *Ae. albopictus* проник путем разлета по долине реки Мзымта из Адлера. От Туапсе, где обнаружены оба вида, по долинам рек Туапсе и Пшиш возможно проникновение комаров также естественным путем на низменности в окрестностях Краснодарского водохранилища (рис. 1). Таким образом, реализация климатических предпосылок расширения ареалов будет происходить как при участии человека, так и путем естественного разлета комаров.

Для дальнейшего анализа необходимо рассмотреть эпидемиологическую ситуацию, связанную с основными заболеваниями, переносчиками возбудителей которых являются *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus*.

Эпидемиологическая ситуация, связанная с тропическими лихорадками, переносчиками вирусов которых являются *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus*

Желтая лихорадка является эндемичным заболеванием для 13 стран Южной и Центральной Америки (10° с. ш. — 30° ю. ш.) и 45 стран Африки (16° с. ш. — 10° ю. ш.). В мире регистрируется ежегодно около 200 тыс. случаев желтой лихорадки, из них 30 тыс. заканчиваются летально. Летальность же при вспышках этой инфекции может составлять от 21 до 53%. Особенно высокой бывает

летальность при эпидемиях по границам нозоареала инфекции, где мала иммунная прослойка населения. Благодаря вакцинации заболеваемость желтой лихорадкой в последние годы снижается (Львов и др., 1989; Эпидемиологическая обстановка по опасным инфекционным болезням в России и мире, 19.12.2012 г.). Сведениями о завозных случаях на территорию России авторы не располагают.

Лихорадка Денге регистрируется в сотне стран с тропическим и субтропическим климатом Африки, Южной и Юго-Восточной Азии, Центральной и Южной Америки, Австралии, Южной Европы. Ежегодно в мире заболевают лихорадкой Денге более 50 млн человек, из них умирают около 20 тыс. В России количество завозных случаев за последние годы таково: 2012 год — 63 случая; 2013 год — 170; 2014 год — 105; 2015 год — 136; 2016 год — 140; 2017 год (за 11 месяцев) — 152. Заражение произошло в Таиланде, Вьетнаме, Индонезии, Индии, Бангладеш, Гонконге, на Мальдивских островах (Роспотребнадзор информирует о ситуации с лихорадкой Денге..., 2018; О ситуации по лихорадке Денге, 12.07.2016 г.; О вспышке лихорадки Денге в Шри-Ланке, 23.12.2016 г.; Эпидемиологическая обстановка по опасным инфекционным болезням в России и мире, 19.12.2012 г.).

Лихорадка Чикунгунья отмечается в 40 странах Азии, Африки, Европы и Америки; наиболее распространена в Индии, на островах Индийского океана, Юго-Восточной Азии, Центральной и Южной Америке. В настоящее время наблюдается обострение эпидемиологической ситуации в Бразилии. Если в 2015 г. в этой стране было выявлено 26,5 тыс. больных (6 летальных исходов), то в 2016 г. — более 250 тыс. человек, из них 138 погибли. Надо отметить, что состояние этих больных было отягощено уже имевшимися заболеваниями. Согласно сообщению Роспотребнадзора, в России регистрируются единичные завозные случаи (О заболеваемости лихорадкой Чикунгунья в Бразилии, 23.12.2016).

Лихорадка Зика. В нашей более ранней публикации (Ясюкевич и др., 2016) подробно рассмотрено это заболевание и связанные с ним аспекты. В преддверии XXXI Летних Олимпийских Игр 5—21 августа 2016 г. в Рио-де-Жанейро эпидемия лихорадки Зика, перешедшая в

пандемию, вызвала большой общественный резонанс. Случаи заболевания в результате местной передачи регистрируются в 62 государствах, из них Американского региона — 48, а также ряде стран Юго-Восточной Азии и Тихоокеанского региона. Безусловным лидером в этом списке является Бразилия. Растет число случаев заражения лихорадкой Зика половым путем (Об эпидемиологической ситуации, связанной с распространением вируса Зика в мире на 16.12.2016). Течение болезни доброкачественное, но возможны осложнения — патология развития плода (микроцефалия) и синдром Гийена-Барре (аутоиммунное неврологическое расстройство).

В общей сложности за период с 01.01.2015 г. по 27.02.2017 г. зарегистрированы 7874 завозных случая лихорадки Зика в 62 странах мира, в том числе в России — 18 завозных случаев (Об эпидемиологической ситуации, связанной с распространением вируса Зика в мире на 27.02.2017).

Однако к осени 2016 г. наметился резкий спад заболеваемости, а в июле 2017 г. больные практически не регистрировались (Cohen, 2017).

Меры специфической профилактики лихорадок Денге, Чикунгунья, Зика отсутствуют (вакцины не разработаны).

Рассматриваемые в этой публикации вирусные лихорадки являются природно-очаговыми. Резервуары инфекции — прежде всего обезьяны, на Американском континенте — опоссумы, в случае лихорадки Чикунгунья дополнительно некоторые тропические грызуны и летучие мыши (Тарасов, 2002). Возбудители этих заболеваний не размножаются и не накапливаются в комарах при сравнительно невысоких температурах. Известно, что после заражающего кормления (питания комара на больном животном или человеке) вирус желтой лихорадки обнаруживается в слюнных железах *Aedes aegypti* при температуре 37°C через 4 суток, при 36 — через 6 суток, при 25 — 8 суток, при 23 — 11, при 21 — 18, а при 18°C в течение жизни комара не обнаруживается. Вирус лихорадки Денге не размножается при температурах ниже 22°C. Аналогична ситуация и с другими возбудителями (Тарасов, 2002). Таким образом, по климатическим и биологическим причинам образование природных очагов на территории России невозможно.

Оценка риска для здоровья населения России

Как было показано выше, в настоящее время *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus* распространены на узкой прибрежной полосе Черноморского побережья Кавказа (рис. 1). На большом удалении от побережья эти виды не отмечены. Существующие климатические предпосылки к распространению по территории России пока не реализованы. К концу XXI в. станет возможным укоренение этих видов (*Ae. albopictus*) не только на юге России, но и в государствах, граничащих с запада, а также непосредственно в западных ее областях. Однако, при реализации любого сценария изменения климата он останется на Европейской территории России более континентальным, чем в Западной Европе, что не будет способствовать столь широкому распространению *Ae. albopictus* (а в будущем, возможно, и *Ae. aegypti*), как в последней.

Завоз вирусных лихорадок, специфическими переносчиками возбудителей которых являются эти виды, на территорию России невелик. Так, завозных случаев лихорадки Денге отмечается ежегодно около 1,5 сотен. По сложившейся традиции, граждане России выезжают в эндемичные по этому заболеванию страны в зимнее время, вне возможного сезона передачи в нашей стране. По остальным заболеваниям случаи завоза единичны. Возникновение природных очагов этих заболеваний на территории России невозможно, однако нельзя исключить возможность эпидемических вспышек в теплое время года.

Тем не менее, авторы считают маловероятным, что больной с не выявленной вовремя лихорадкой окажется во время сезона передачи в весьма ограниченных ныне местах обитания комаров этих видов и станет источником заражения переносчиков и, соответственно, причиной эпидемической вспышки.

Таким образом, в настоящее время, как мы полагаем, риск возникновения эпидемических вспышек тропических лихорадок, связанных с *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus*, очень мал. В дальнейшем, по мере возможной реализации климатических предпосылок, способствующих распространению комаров этих видов по территории

России, риск возникновения эпидемических ссылок в теплое время года может существенно увеличиться.

Это положение подтверждается ситуацией в Южной Европе. По данным сайта (<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs117/ru/>) в 2010 году местная передача денге (от завозных случаев) была впервые зарегистрирована во Франции и Хорватии. В 2012 г. вспышка лихорадки Денге на островах Мадейра, Португалия, привела более чем к 2 тыс. случаев заболевания. В XIX — начале XX века в Испании, Португалии, Франции, Англии, Италии (преимущественно в портовых городах) отмечались и вспышки желтой лихорадки ([http://бмэ.орг/index.php/Желтая лихорадка](http://бмэ.орг/index.php/Желтая_лихорадка); <http://med-tutorial.ru/med-books/book/72/page/7-gemorragicheskie-lihoradki/61-zheltaya-lihoradka>).

Возможные меры адаптации к создавшейся ситуации — энтомологический мониторинг состояния популяций *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus*, при котором особое внимание нужно уделить оценке распространения этих видов вглубь территории России от узкой прибрежной полосы. Планирование инсектицидных обработок следует производить по результатам мониторинга. Населению следует рекомендовать применение репеллентов, защитных пологов, установку защитных сеток на окна. Не следует также оставлять открытыми всевозможные емкости для воды, где возможен выплод комаров.

Заключение

Как было показано выше, в настоящее время *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus* распространены на узкой прибрежной полосе Черноморского побережья Кавказа. На большом удалении от побережья эти виды не отмечены. Существующие климатические предпосылки к распространению по территории России пока не реализованы. К концу XXI века станет возможным укоренение этих видов не только на юге России, но и в государствах, граничащих с запада, а также непосредственно в западных ее областях (*Ae. albopictus*). Таким образом, в настоящее время, риск

возникновения эпидемических вспышек тропических лихорадок, связанных с *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus*, очень мал. В дальнейшем, по мере возможной реализации климатических предпосылок, способствующих распространению комаров этих видов по территории России, риск может существенно увеличиться.

Публикация подготовлена в рамках выполнения:

1) *Целевой научно-технической программы «научно-исследовательские, опытно-конструкторские, технологические и другие работы для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» на 2017—2019 годы;*

2) *Темы 77 программы Фундаментальных Научных Исследований государственных академий наук на 2013—2020 гг.: «Физические и химические процессы в атмосфере, криосфере и на поверхности Земли, механизмы формирования и современные изменения климата, ландшафтов, оледенения и многолетнемерзлых грунтов в части 77.1: Решение фундаментальных проблем анализа и прогноза состояния климатической системы Земли». Регистрационный № 01201352499. Гос. задание № 0148-2014-0005.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас СССР. (1986). — М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР. С. 43.

Безжоннова О. В., Патраман И. В., Ганушкина Л. А., Вышемирский О. И., Сергеев В. П. (2014). Первая находка инвазивного вида *Aedes (Finlaya) koreicus* Edwards, 1917 в Европейской части России // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 1. С. 16—19.

Ганушкина Л. А., Дремова В. П. (2011). Комары *Aedes aegypti* и *Aedes albopictus* – переносчики арбовирусных инфекций, биология, экология, распространение, отличительные признаки видов // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 4. С. 24—28.

Ганушкина Л. А., Дремова В. П. (2012). Комары *Aedes aegypti* L. и *Aedes albopictus* Skuse – новая биологическая угроза для юга России // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 3. С. 49—55.

Ганушкина Л. А., Таныгина Е. Ю., Безжонова О. В., Сергеев В. П. (2012). Об обнаружении комаров *Aedes (Stegomyia) albopictus* Skus. на территории Российской Федерации // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 1. С. 3—4.

Ганушкина Л. А., Безжонова О. В., Патраман И. В., Таныгина Е. Ю., Сергеев В. П. (2013). Распространение комаров *Aedes (Stegomyia) aegypti* L. и *Ae. (Stegomyia) albopictus* Skus. на Черноморском побережье Кавказа // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 1. С. 45—46.

Ганушкина Л. А., Морозова Л. Ф., Патраман И. В., Сергеев В. П. (2014). Оценка риска расширения ареала комаров *Aedes aegypti* L. и *Ae. albopictus* Skus. на территории России // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 4. С. 8—10.

Гуцевич В. А., Мончадский А. С., Штакельберг А. А. (1970). Комары (семейство *Culicidae*). / Фауна СССР. Насекомые двукрылые. Т. 3, Вып. 4. — Л.: Наука. 384 С.

Львов Д. К., Клименко С. М., Гайдамович С. Я. и др. (1989). Арбовирусы и арбовирусные инфекции. — М.: Медицина. 336 С.

О заболеваемости лихорадкой чикунгунья в Бразилии, 23.12.2016, URL: http://30.rosпотребнадзор.ru/epidemiologic_situation/146430/ (дата обращения 23.января 2017)

О ситуации по лихорадке Денге, 12.07.2016 г.

URL: http://rosпотребнадзор.ru/about/info/news/news_details.php?ELEMENT_ID=6763 (дата обращения 14.июля 2016)

О вспышке лихорадки Денге в Шри-Ланке, 23.12.2016 г. URL: http://30.rosпотребнадзор.ru/epidemiologic_situation/146429/ (дата обращения 26 декабря 2016)

Об эпидемиологической ситуации, связанной с распространением вируса Зика в мире на 16.12.2016. URL: http://30.rosпотребнадзор.ru/epidemiologic_situation/146431/ (дата обращения 26 декабря 2016)

Об эпидемиологической ситуации, связанной с распространением вируса Зика в мире на 27.02.2017, URL:

http://rosпотребнадзор.ru/about/info/news/news_details.php?ELEMENT_ID=7950 (дата обращения 27 февраля 2017)

Попов И. О., Туткина С. Н., Семенов С. М., Ясюкевич В. В. (2013). Модельные оценки распространения переносчиков некоторых болезней человека в XXI веке в России и соседних странах. / В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. — М.: ИГКЭ. С. 395—427.

Роспотребнадзор информирует о ситуации с лихорадкой Денге в Шри-Ланке, Бразилии, Вьетнаме, Индонезии и Таиланде. 2 января 2018 г. <https://gotro.ru/news/2018/denge-shri-lanka/>

Рябова Т. Е., Юничева Ю. В., Маркович Н. Я., Ганушкина Л. А., Орабей Г. В., Сергиев В. П. (2005). Обнаружение комаров *Aedes (Stegomyia) aegypti* L. в г. Сочи // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 3. С. 3—5.

Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. (2006). Выявление климатогенных изменений. — М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 с.

Тарасов В. В. (2002). Эпидемиология трансмиссивных болезней. — М.: Изд-во МГУ. 336 с.

Тропические болезни. (1978). / Под. ред. Е. П. Шуваловой /. — М.: Медицина. 592 с.

Эпидемиологическая обстановка по опасным инфекционным болезням в России и мире, 19.12.2012 г., URL: <http://30.rospotrebnadzor.ru/directions/nadzor/92410/> (дата обращения 25 декабря 2016)

Юничева Ю. В., Рябова Т. Е., Маркович Н. Я., Безжонова О. В. и др. (2008). Первые данные о наличии размножающейся популяции комаров *Aedes aegypti* L. в районе Большого Сочи и в отдельных городах Абхазии // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 3. С. 40—43.

Ясюкевич В. В., Туткина С. Н., Попов И. О., Давидович Е. А., Ясюкевич Н. В. (2013). Климатозависимые заболевания и членистоногие переносчики: возможное влияние наблюдаемого на территории России изменения климата. / В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. — М.: ИГКЭ. С. 314—359.

Ясюкевич В. В., Ясюкевич Н. В., Рудкова А. А. (2016). Лихорадка Зика // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 27. № 1. С. 124—132.

Cohen J. (2017). Zika has all but disappeared in the Americas. Why? URL: <http://www.sciencemag.org/news/2017/08/zika-has-all-disappeared-americas-why>

Ganushkina L. A., Patraman I. V., Rezza G., Migliorini L., Litvinov S. K., Sergiev V. P. (2016). Detection of *Aedes aegypti*, *Aedes albopictus* and *Aedes koreicus* in the Area Sochi, Russia // Vector-borne and zoonotic diseases. Vol. 16. № 1. P. 58—60.

Geographical distribution of arthropod-borne diseases and their principal vectors. (1989). (WHO/VBC/ 89.967). Geneva. 134 P.

Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes in Europe. (2012). — Stockholm: ECDC. 100 p.

URL: <http://ecdc.europa.eu/en/healthtopics/vectors/mosquitoes/Pages/aedes-aegypti.aspx> (дата обращения 25 февраля 2017) (дата обращения 25 августа 2017)

URL: <http://ecdc.europa.eu/en/healthtopics/vectors/mosquitoes/Pages/aedes-albopictus.aspx>
(дата обращения 25 февраля 2017)

Knudsen A. B. (1995). Global distribution and continuing spread of *Aedes albopictus* // *Parassitologia*. Vol. 37. № 2—3. P. 91—97.

Kobayashi M., Nihei N., Kurihara T. (2002). Analysis of Northern Distribution of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Japan by Geographical Information System // *J. Med. Entomol.* Vol. 39. № 1. P. 4—11.

Kobayashi M., Komagata O., Nihei N. (2008). Global Warming and Vector-borne Infectious Diseases // *Journal of Disaster Research*. Vol. 3. № 2. P. 105—112.

Neteler M., Roiz D., Rocchini D., Castellani C., Rizzoli A. (2011). Terra and Aqua satellites track tiger mosquito invasion: modelling the potential distribution of *Aedes albopictus* in north-eastern Italy // *International Journal of Health Geographics*. Vol. 10. URL: <http://www.ijhealthgeographics.com/content/10/1/49> (дата обращения 25 февраля 2017)

Tatem A. J.; Hay S. I., Rogers D. J. (2006). Global traffic and disease vector dispersal // *Proceedings of National Academy of Sciences of the USA*. Vol. 103. № 16. P. 6242—6247.

УДК 551.5

**ПАМЯТИ ИЛЬИ МОИСЕВИЧА ИМЯНИТОВА
(1918—1987)**

К 100-летию со дня рождения

Ю. П. Михайловский¹, Л. В. Кашлева², В. Н. Морозов¹

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

² Российский государственный гидрометеорологический университет
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98
E-mail: yurpalych@ya.ru

Поступила в редакцию 9.04.2018



Имянитов И. М. — исследователь атмосферного электричества, разработчик приборов и методов измерения электрических полей в атмосфере при помощи самолетов. Автор и организатор исследований электрических свойств облаков.

Вспоминая Илью Моисеевича Имянитова

14 марта 2018 года Илье Моисеевичу Имянитову исполнилось бы сто лет. Если бы он был жив. Но он умер в январе 1987 года в возрасте 68 лет. Мальчишеский возраст по сегодняшним меркам Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, где он работал со времен войны. Илья Моисеевич руководил лабораторией свободной атмосферы в отделе атмосферного электричества. В те годы это была престижная должность, ведь некоторыми лабораториями руководили академики. От чего была «свободна» атмосфера, которую мы изучали под руководством Имянитова, остается для меня загадкой по настоящее время. Скорее даже наоборот — она, эта «свободная атмосфера», была переполнена всеми проблемами атмосферного электричества: полем «хорошей погоды», унитарной вариацией, самолетными, лабораторными и модельными исследованиями электризации конвективных облаков, электризацией самолетов в облаках и условиями их поражения молниями в слоистых облаках, разработкой технологии самолетных измерений атмосферно-электрических параметров, активными воздействиями на электризацию и множеством других вопросов. Решением всех этих проблем, напрямую или исподволь, руководил Илья Моисеевич, обладавший несомненным авторитетом в отделе, обсерватории, стране, да и, пожалуй, в мире.

Мы выбрали для этой статьи форму личных воспоминаний людей, достаточно близко общавшихся с Ильей Моисеевичем — его учеников. Учеников было много. Все, кто общался с Имянитовым, учились у него. У него было чему поучиться, и он был открыт общению. Его интересовали люди, поэтому и он тоже учился у всех своих учеников. Выбранный нами жанр личных воспоминаний не позволяет нам обойтись без упоминаний самих себя. Просим за это прощения у читателей.

Я пришел в ГГО в 1976 году после трех лет работы по распределению. В университете получил хорошую инженерную подготовку по специальности «Физические поля кораблей». За три года закончил вечерний мат-мех ЛГУ, научился прилично

программировать. И решил, что способен изучать «объективные законы природы».

В отделе атмосферного электричества существовала традиция, что вся приходящая молодежь проходила собеседование с Ильей Моисеевичем. Ходили легенды, что он заставлял соискателей рисовать слона в рамке и по результатам этого теста определял профпригодность будущих ученых. В общем, я слегка волновался, так как рисовал слонов не очень хорошо. Имянитов умел производить впечатление крупного ученого. Ему было 58 лет, но мне показалось, что он старше, и уже академик. В крайнем случае, член-корреспондент! Его крупная осанистая фигура, черный кожаный пиджак, умные глаза — это был настоящий ученый из кино про ученых! Он расспрашивал, кто и чему меня учил и, выяснив, что ни Френкеля, ни других известных ему академиков среди них не было, начал постепенно терять ко мне интерес. В конце разговора он бросил мне соломинку: «А как у Вас с языками? Владете?» Я тут же воспрянул: «Ну да, конечно, владею свободно!» «И какими же?» — с вновь проснувшимся интересом взглянул он на меня. «Да практически всеми существующими!» — гордо ответил я. Его лицо выразило настолько чрезвычайную степень удивления, что я даже слегка обеспокоился его самочувствием. Секунд через 10 молчания я понял, что мы говорим о разных языках. Тем не менее, этот эпизод его позабавил, как мне показалось, и в результате я стал работать в его лаборатории старшим инженером с окладом 130 рублей. Кстати, это было на 20 рублей меньше, чем я зарабатывал на предыдущем месте работы.

Методика работы Имянитова с молодежью была проста. Раз в неделю он вызывал каждого «молодого специалиста» на «ковер», и мы должны были рассказывать о выполненной за неделю работе. Чаще всего об этом можно было сказать исчерпывающе ясно двумя-тремя словами. Но это было не принято, и большинство начинало рассказывать о том, что они собирались сделать, и о том, что им помешало сделать хоть что-нибудь. Рассказывали «докладчики» обычно без какого-либо энтузиазма, монотонно и негромко. Это действовало очень усыпляюще, и бывало, что Илья Моисеевич

начинал дремать в своем уютном кресле. Некоторые из нас почтительно замолкали, другие, посмелей, начинали кашлять или скрипеть стульями. Очнувшись, профессор без тени смущения оглядывал нас с высоты своего положения и говорил: «Продолжайте, пожалуйста!» Несмотря на кажущуюся простоту, метод был довольно действенным, и, поговорив пару раз таким образом о своих планах, ты понимал, что все надо делать по-другому. Имянитов называл этот свой метод «методом теннисной стенки», подразумевая под стенкой себя. Несмотря на внешнюю и внутреннюю мягкость, Илья Моисеевич был настойчивым и последовательным в достижении своих целей. В том числе и в отношении нас, молодежи. Меня, например, он решил направить по пути математического описания и программирования своих идей о контактном механизме электризации облаков и автоматизации обработки самолетных данных. Я же хотел летать «на грозу»! Более года Имянитов не пускал меня на самолеты, говоря, что есть и другие интересные дела. И более важные. Все это время я постоянно повторял, что я хочу, что это будет полезно и даже необходимо для той работы, которую он поручил мне. В конце концов он поверил в мои способности экспериментатора и начал «натаскивать» меня на эту роль. Благо в отделе появились люди, которые могли «математизировать» и программировать, и при этом не хотели летать!

При всей подвижности нервной системы и артистизме, Илья Моисеевич обладал завидным самообладанием и уверенностью в своих силах. Молодежи обязательно рассказывали то ли легенду, то ли быль об этом. На одном из отчетов по теме в спешке повесили один из плакатов не так, как нужно. Имянитов доложил, как обычно, блестяще. В том числе и по этому плакату. Но какой-то дотошный слушатель заметил оплошность с плакатом и обратил внимание докладчика на сей факт. Ничуть не смутившись и задумавшись не более чем на несколько секунд, Илья Моисеевич с тем же блеском изложил новую трактовку представленной на плакате закономерности. Также в русле основных, полученных по теме результатов. Впрочем, он не был одинок в такой способности

к импровизации, являющейся, по-видимому, одним из основных признаков крупного ученого.

Атмосфера в отделе внешне была спокойной. Но в воздухе ощущалась недавняя «гроза», и временами между некоторыми сотрудниками «проскакивали искры». Старожилы отдела в доверительных беседах рассказывали, что до «грозы» Илья Моисеевич был душой компании, что при его многочисленных талантах было не мудрено. Любил танцевать, посидеть за «рюмкой чая». В мою бытность в отделе он уже не принимал во всем этом участия и обычно уходил после официальной части. Может уже начинала сказываться болезнь, а может он уже не ощущал душевного комфорта в большой и разношерстной компании нашего отдела. Положение еще более усугубилось после известного совещания по проблеме активных воздействий в Репино. И. М. Имянитов руководил проектом, в выполнении которого участвовали практически все НИУ Гидрометслужбы СССР. Ответственность огромная, полномочий явно недостаточно. Наверное, были проблемы. Руководство Гидрометслужбы в очень жесткой форме и публично назначило виновным Илью Моисеевича. Слов в его поддержку не прозвучало.

Мне показалось, что после этого у него из глаз исчез блеск. А может причиной исчезновения этого блеска стала прогрессирующая смертельная болезнь. Потому как держать удар и не сдаваться Илья Моисеевич Имянитов умел. Вся его жизнь служит подтверждением этому.

Ю. П. Михайловский

Илья Моисеевич Имянитов. Воспоминания о научном руководителе

Я поступила в аспирантуру ГГО к Илье Моисеевичу Имянитову в отдел атмосферного электричества в 1983 году по направлению Северо-Кавказского управления гидрометслужбы. Грозы для Северного Кавказа — очень важная тема. И меня направили туда, где изучают грозы. Уже в отделе я узнала, что книга «Иду на грозу» была

написана, точнее, списана с нашего отдела атмосферного электричества. А главный герой — с Ильи Моисеевича.

Для меня — человека, прежде занимавшегося оперативной работой авиационного метеоролога — была непривычна атмосфера научных исследований и поиска ответов на любые вопросы об окружающем мире. Обсуждалось всё: лабораторные эксперименты в камере туманов, теоретические модели электризации облаков, вопросы глобальной электрической цепи атмосферы, самолетные эксперименты, новые литературные произведения, концерты, кинопремьеры, выставки, обязательно — шахматы и спортивные соревнования. Эта деятельная, очень активная жизнь и радостное общение завораживали. Илья Моисеевич уже не был в центре этого круговорота, но он определял уровень наших интересов и поисков.

Непривычным было и общение с научным руководителем. Илья Моисеевич не опекал и не направлял своих учеников. Он ставил перед ними задачу и всегда был открыт к обсуждению результатов работы. Помогал задавать вопросы, которые как раз и двигали мысль в нужном направлении. И, что самое главное, — никогда не настаивал на собственном мнении. Никогда не подгонял, позволяя каждому двигаться с той скоростью, которая была ему наиболее свойственна. Нас одновременно было десять аспирантов и соискателей. У каждого была своя тема диссертационной работы. Только теперь я понимаю, насколько широк был круг научных интересов Ильи Моисеевича.

В отделе почти все сотрудники в разное время были его учениками. Замечательная атмосфера коллектива единомышленников, увлеченных исследованием явлений атмосферного электричества. Не удивительно, что в то время именно наш отдел определял направления всесторонних исследований электричества атмосферы в Советском Союзе. Даже краткий перечень изучаемых вопросов поражает: происхождение электрического поля атмосферы, электричество туманов, облаков и осадков, лабораторные и натурные, включая самолетные, эксперименты, создание исследовательской аппаратуры для измерения параметров атмосферного электричества, заряда самолета и облачных частиц. К сожалению, я очень мало

проработала под руководством Ильи Моисеевича, но за это время научилась очень многому.

О жизни Имянитова мы знали мало — слишком большое расстояние было между ним и нами, его «птэнцами». Но хочу вспомнить о том, как он стал ученым-метеорологом. В 1941 году Илья Моисеевич, инженер-исследователь Кировского завода, ушел в ополчение. После ранения был демобилизован и эвакуирован в Свердловск. Поступил на работу в ближайший НИИ. Это была Главная геофизическая обсерватория, тоже эвакуированная на Урал. И увлекся исследованиями атмосферы. Тайны атмосферного электричества, грозы захватили его позже, после окончания аспирантуры. Но память о войне навсегда осталась для него священной.

Илья Моисеевич был очень демократичным руководителем. Это отсутствие напряжения при общении приводило к тому, что мы, молодежь, его просто не понимали. Часто ожидали, что нас будут вести за руку, принимать за нас какие-то решения. Но этого не было. Мудрый руководитель, наблюдающий за нами из своего «далёка», при этом всегда готовый помочь, — именно таким его вспоминаю.

Илья Моисеевич был не только исследователем атмосферы, но и замечательным литератором, автором повестей, рассказов и эссе. Мне кажется, главное в его личности то, что он всю жизнь оставался романтиком. Прочтите его художественные произведения! Они позволят вам проникнуть в самую суть исследовательского механизма, понять процесс становления идей — процесс, в котором мечта становится действительностью.

Л. В. Кашлева

Воспоминания о профессоре, докторе физико-математических наук И. М. Имянитове

В сущности, я попал в лабораторию электричества свободной атмосферы отдела атмосферного электричества ГГО, которой руководил профессор Илья Моисеевич Имянитов, довольно случайно, в октябре 1977 года. До этого я окончил аспирантуру ЛГУ

по специальности «Астрофизика» и защитил кандидатскую диссертацию по магнитогидродинамическим течениям плазмы из нестационарных звезд. Затем были три года работы на Севере, где я преподавал высшую математику в Ухтинском индустриальном институте. После возвращения в Ленинград в 1977 г. для меня встал вопрос о дальнейшей научной работе. Тут я вспомнил о своем увлечении в юности физикой газового разряда и восхищением книгой Даниила Гранина «Иду на грозу», которая была написана на основе деятельности отдела атмосферного электричества. Явившись как бы с улицы, я неожиданно стал сотрудником этого отдела и начал работать под руководством И. М. Имянитова.

При встрече с Ильей Моисеевичем меня, окончившего математический факультет, поразила его научная интуиция, его способность объяснять физические процессы в атмосфере качественно, не прибегая к сложным математическим расчетам. В те годы одним из направлений деятельности нашей лаборатории были теоретические и экспериментальные исследования контактного механизма электризации облачных частиц и осадков.

Илья Моисеевич был выдающимся исследователем в области атмосферного электричества. Под его руководством в лаборатории были разработаны приборы по измерению напряженности электрического поля в атмосфере и электропроводности воздуха, как для самолетных, так и для наземных исследований. Были проведены экспериментальные и теоретические исследования контактного механизма электризации частиц в облаках. Эксперименты по исследованию этого механизма проводились в камерах туманов сначала в Институте геофизики Грузинской АН, а затем в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в Ленинграде. Результаты этих исследований опубликованы в монографии Дьяконовой, Имянитова и других в 1985 году и ряде статей в журналах и сборниках.

Надо отметить, что рассмотренный механизм электризации получил всемирное признание и широко используется в современных численных моделях грозовых облаков. В обзоре, написанном мной по материалам зарубежных работ, представлены модели грозовых

облаков, в которых учитывается механизм электризации ледяных частиц различных типов при их столкновении.

Другой проблемой, волновавшей Илью Моисеевича как исследователя, была проблема происхождения и природа электрического поля атмосферы и природа его вариаций различных временных масштабов. Эта проблема была впервые рассмотрена в статье, написанной совместно с Шифриным и опубликованной в журнале «Успехи физических наук». Монография, написанная совместно с Е. В. Чубариной, посвящена самолетным исследованиям электрического поля атмосферы с учетом влияния аэрозольной составляющей атмосферы, как естественного, так и антропогенного происхождения.

Надо отметить, что важную роль в динамике электрического поля атмосферы И. М. Имянитов отводил конвективным процессам в атмосфере, считая их причиной образования грозных облаков, которые представляют локальные области, в которых происходит генерация электрических зарядов под действием сил неэлектрического происхождения. По его мнению, конвективные и турбулентные движения приводят к формированию конвективного токового генератора, который наряду с грозными генераторами может участвовать в создании унитарной вариации электрического поля атмосферы. Теоретическое подтверждение качественных соображений, выдвинутых в статье Имянитова и Колоколова в 1974 году, нашло отражение в работах его учеников, в которых квазистационарная модель электрического поля атмосферы с грозными генераторами была обобщена на случай учета конвективного генератора, действующего в пограничном слое атмосферы. Илья Моисеевич также считал, что будущая модель глобальной токовой цепи должна быть нестационарной и учитывать разнообразие нестационарных электрических процессов, происходящих в земной атмосфере, таких как грозные разряды различных типов, токи осадков, коронирующие токи.

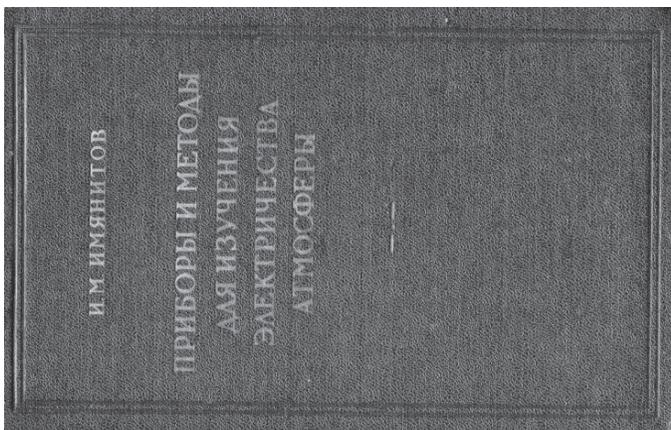
Илья Моисеевич был высокообразованным, интеллигентным человеком. Он оставил после себя не только научные статьи, монографии и изобретения, но и литературные произведения, включая

прозу и поэзию. Полную библиографию его литературного творчества можно найти в посвященном его памяти сборнике статей «Вопросы атмосферного электричества»¹.

Скончался Илья Моисеевич в январе 1987 года после долгой болезни. Но мы, его ученики и последователи, помним своего наставника и стараемся продóлжить исследования атмосферного электричества, несмотря на тяжелое положение нашей науки в настоящее время.

В. Н. Морозов

¹ Вопросы атмосферного электричества. Сборник статей (1990). — Л.: Гидрометеиздат. 187 с.

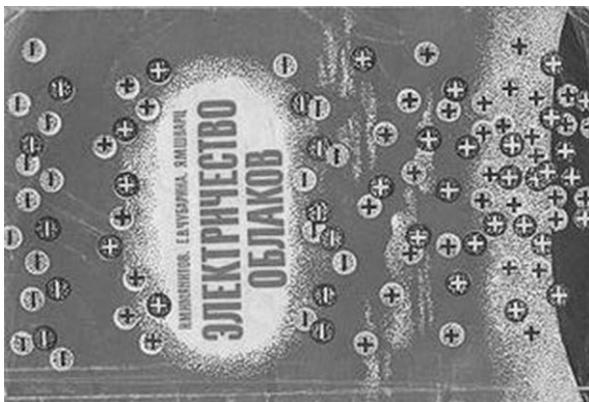
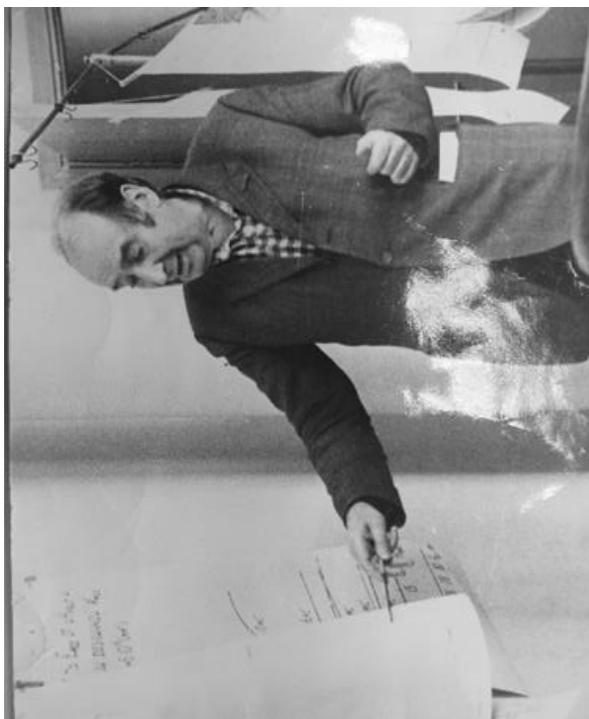


И. М. Имянитов

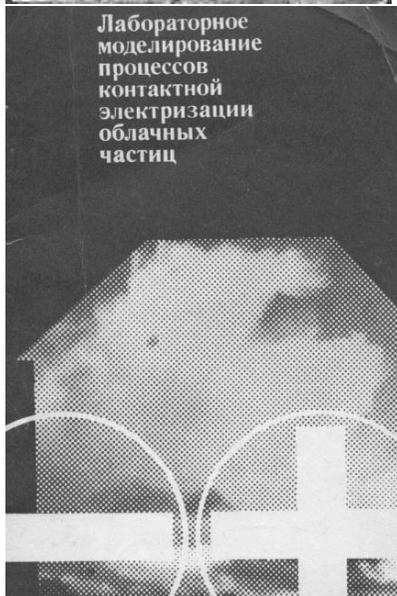


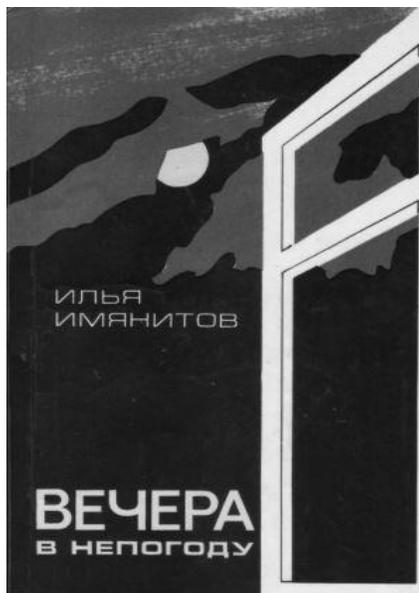
И. М. Имянитов согласовывает с КВС ход эксперимента по исследованию грозовой облака.





Во время доклада на заседании Ученого совета ГГО.





УДК 551.5

ПРОРЫВ В СТРАТОСФЕРУ
(к 125-летию со дня рождения
Павла Александровича Молчанова)

К. Ш. Хайруллин

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

Поступила в редакцию 3.04.2018



Павел Александрович Молчанов
(1893—1941)

Развитие метеорологической науки в России в XIX веке, связанное со становлением синоптической метеорологии и прогнозов погоды, требовало изучения верхних слоев атмосферы. 30 июня 1804 года при участии академика Я. Д. Захарова состоялся полет на воздушном шаре с регистрацией метеорологических данных. В 1845 году профессор Казанского университета А. Ф. Попов предложил получать метеорологическую информацию об атмосфере с помощью бумажных воздушных змеев, которые стали использоваться также в ряде других стран (Германия, Франция). В 1869 году другой профессор Казанского университета И. А. Больцано на Втором съезде естествоиспытателей в Санкт-Петербурге информировал о результатах измерений температуры воздуха и давления, полученных с помощью аэростатов. В 1896 году была создана Международная воздухоплавательная комиссия, в которую вошли сотрудники Главной физической обсерватории М. А. Рыкачев и М. М. Поморцев; тогда же ГФО стала регулярно запускать шары-зонды с самопишущими приборами. С 1897 года начался регулярный запуск змеев с приборами конструкций М. А. Рыкачева и В. В. Кузнецова (последний возглавил змейковый отдел в Павловской обсерватории — филиале ГФО). Следует отметить, что после запуска шаров-пилотов и зондов значительная часть приборов пропадала или приходила в негодность, и многие записи не поддавались обработке. Требовалось дальнейшее развитие и усовершенствование приборов и методов обработки наблюдений, крайне необходимых для развития авиационной метеорологии и улучшения прогнозов погоды.

В годы Первой мировой войны в ГФО появился молодой сотрудник Павел Александрович Молчанов. Он родился 6 февраля 1893 года в селе Волосово Тверской губернии. Вскоре семья переехала в приволжское село Кимры. Будучи рожденным в семье сельского священника, он был отдан учиться в духовное училище, которое успешно закончил, после чего поступил в Тверскую духовную семинарию. После окончания семинарии Павел успешно сдал экзамены на аттестат зрелости в Ржевской мужской гимназии и в 1910 году поступил в Московский университет на физико-математический факультет, но через два года перевелся в Санкт-

Петербургский университет. В годы студенчества сильно нуждался и подрабатывал репетитором, тем не менее прекрасно сдал экзамены и в 1914 году с отличием закончил университет.

Шел 1915 год — второй год Мировой войны, и Молчанов был призван в армию рядовым, но как имеющий высшее образование был зачислен в Воздушную дивизию Балтийского моря, а затем откомандирован стажером в Главную физическую обсерваторию в Петрограде, где началась его научная деятельность. Первое упоминание о его работе в должности физика отделения ежедневного бюллетеня погоды находим в отчете ГФО за 1916 год. В обязанности Молчанова входил сбор аэрологических сведений, полученных вблизи линии фронта, с целью корректировки прогнозов погоды, так как наземных наблюдений было недостаточно.

В ГФО готовились метеорологические пособия для наблюдателей, в том числе по аэронавигации. В 1917 году были изданы «Атлас облаков» под редакцией В. В. Кузнецова и «Курс аэронавигации», состоящий из 12-ти разделов. Среди авторов следует упомянуть А. А. Фридмана, Н. Н. Калитина и П. А. Молчанова. Последнему принадлежат разделы: «Исследование воздушных течений методом шаров-пилотов», «Основные сведения по метеорологии и синоптической метеорологии для летчиков-воздухоплателей», «Общие сведения о воздушных течениях», «Распределение температуры и ветра в барометрических областях» и «Влияние неровностей земной поверхности на воздушные течения».

В 1917 году группа ученых ГФО и среди них Молчанов направила в Министерство земледелия докладную записку о создании Центрального института практической метеорологии. Молчанов опубликовал статью об основах практической метеорологии, где определил главные направления научных поисков, куда включил объединение метеорологических организаций страны, создание авиационных и морских служб. В дальнейшем под руководством А. Н. Крылова (в 1918 году) были выработаны «Основные положения о Российской геофизической ассоциации», в которых Молчанов и Фридман разработали проекты создания институтов практической,

теоретической и сельскохозяйственной метеорологии. Но все эти предложения реализованы не были.

После демобилизации осенью 1918 года Молчанов был направлен в ГФО для работы в Аэрологической обсерватории (филиале ГФО), которая находилась в г. Павловске. Руководитель АО В. В. Кузнецов предложил Молчанову развивать исследования по применению аэрологии в синоптике и руководить работами в этой области. Молодой ученый уделял большое внимание змейковым наблюдениям и совершенствовал свои навыки в конструировании метеорологических приборов. На изобретательность и работоспособность Молчанова обратил внимание будущий директор ГГО А. А. Фридман, который сказал о нем: «Его голова полна инициативы».

В 1919 году Молчанов назначается заведующим Аэрологической обсерваторией. Результаты, выполняемых в обсерватории работ, Молчанов называл аэрологическими «исследованиями», а не «наблюдениями», так как на базе этих наблюдений открывались новые закономерности. На проводимых им научных семинарах делались еженедельные обзоры аэрологических и синоптических условий. Научные результаты публиковались в «Трудах аэрологической обсерватории» и в журнале «Метеорологический вестник».

Молчанову принадлежит исключительная роль в развитии отечественной аэрологии. Он создает многие приборы для изучения верхних слоев атмосферы, в том числе метеорографы: змейковый (в 1920 г.), зондовый и самолетный (в 1921 г.), аэростатный (в 1926 г.). Эти приборы изготавливались в собственных мастерских обсерватории из отечественных материалов.

Метеорографы его конструкций весили меньше зарубежных и надежно работали на больших высотах, поэтому стали выпускаться в ряде других стран, в том числе в Германии.

Кроме того, в 1924 году Молчанов конструирует аэрологический теодолит для наблюдения за шарами при определении нижней границы облаков. Для обработки шаропилотных аэрологических

наблюдений он сконструировал планшет, который получил название «круг Молчанова».

П. А. Молчанов понимал, что существующие традиционные аэрологические методы исчерпали себя, и нужны новые более совершенные методы зондирования атмосферы. Идею использования радио для зондирования атмосферы впервые высказал великий изобретатель А. С. Попов. 7 мая 1902 года на заседании Физического общества он сделал доклад на тему «Прибор, регистрирующий напряжение электрического поля атмосферы для шаров-зондов и для змеев»; затем эта идея была забыта. В 1923 году Молчанов в своей книге «Воздушный океан» высказал аналогичную идею об использовании радио для исследования свободной атмосферы и начал разработку своего прибора. Павел Александрович сам был радиолюбителем и смог заменить записывающую часть метеорографа разработанным им приспособлением для подачи радиосигнала. Ученый придумал остроумную и простую систему кодирования сигналов и создал конструкцию, которую назвал «гребенчатой». Эта конструкция до сих пор является составной частью современных радиозондов. В 1927 году Молчанов закончил разработку принципиальной схемы своего радиозонда и получил на него патент. С 1929 по 1930 годы Молчанов со своими помощниками: аэрологом А. Ершовым, механиками И. И. Семеновым и П. М. Баклуновым — трудились над моделью радиозонда. В эти же годы разрабатывались иные модификации радиозондов (французский, швейцарский, канадский), но с менее удачными конструкциями. В 1927 году в Лейпциге на Международной конференции по исследованию высоких слоев атмосферы Молчанов доложил принцип устройства радиозонда с часовым механизмом.

30 января 1930 года в 13 часов 44 минуты первый в мире радиозонд «271120» весом 3 кг был запущен с территории Аэрологической обсерватории в гор. Слуцке (Павловске) и достиг высоты стратосферы — 7,8 км. Через 32 минуты полета в Ленинградское бюро погоды и Центральный институт прогнозов в Москве было послано первое в мире оперативное аэрологическое сообщение. Это означало колоссальный прорыв в технике

метеорологических наблюдений — открылась возможность получать сведения о состоянии свободной атмосферы до высот вначале около 10—15, а впоследствии 25—30 км. (Второй экземпляр первого в мире радиозонда конструкции Молчанова сегодня хранится в музее ГГО). Радиозонд сразу стал использоваться в прогностических целях, к чему всегда стремился П. А. Молчанов. По отзывам ученых, создание радиозонда открыло новую эру в метеорологии.

Конструкция радиозонда Молчанова оказалась настолько совершенной, что до 1958 года он применялся практически без существенных изменений. С 1935 года радиозонд был дополнен каналом измерения влажности воздуха, что обеспечило измерение всех основных термодинамических характеристик атмосферы.

В настоящее время насчитываются десятки конструкций радиозондов, разработанных в разных странах, в основе которых лежат принципы устройства радиозонда Молчанова. В 1934—1935 гг. в Советском Союзе были открыты 10 пунктов с радиозондовыми наблюдениями, к 1937 году их число увеличилось до 27. В Павловской аэрологической обсерватории, начиная с 1934 г., ежедневно запускались два радиозонда — утром и днем.

Молчанов принимал участие во многих Международных конференциях и съездах и на протяжении ряда лет (1925—1934 гг.) представлял советскую науку в Международной аэрологической комиссии.

Летом 1931 года состоялся знаменитый Арктический рейс немецкого дирижабля «Граф Цеппелин», с борта которого производились первые запуски радиозондов. Руководство метеорологическими и аэрологическими работами было возложено на Л. Вайкмана (Германия) и П. Молчанова (СССР). Запуск дирижабля был произведен с Комендантского аэродрома (Ленинград), откуда был взят курс на Ладожское озеро и далее по маршруту: Земля Франца Иосифа — Таймырский полуостров — Новая Земля — Архангельск — Фридрихсгафен. Полет длился 104 часа, и дирижабль покрыл расстояние в 13028 километров. Выпуском радиозондов с него руководил сам Молчанов.

Павел Александрович активно участвовал в разработке и изготовлении приборов для стратостатов «СССР-1» и «Осоавиахим», которыми были достигнуты рекордные высоты в стратосфере — 18,7 и 22 км соответственно. К сожалению, запуск второго стратостата закончился трагически, он потерпел аварию.

П. А. Молчанов сожалел о том, что на первой ледовой плавучей станции СП-1 не запускались радиозонды (из-за сложности доставки багажа на станцию), но все последующие СП запускали радиозонды системы Молчанова.

В 1936 году Молчанова назначили директором Главной геофизической обсерватории. Павел Александрович считал необходимым развивать в климатологии синоптическое направление и учитывать в ней «третье измерение», то есть развивать аэроклиматологию. Молчанова не удовлетворяло положение в отделе долгосрочных прогнозов, который, по его мнению, недостаточно занимался разработкой физических основ методов прогноза. Всё это вызвало непонимание многих сотрудников ГГО, и вскоре Павел Александрович был вынужден уйти с поста директора, а в 1939 году вообще покинул Гидрометслужбу.

Дальнейшая его деятельность была связана с Военной академией воздушного флота (ныне это Военно-космическая академия им. Можайского).

24 августа 1941 года Павел Александрович Молчанов был арестован органами НКВД по обвинению по статье 58-1а «Измена Родине» УК РСФСР, и связь родных с ним прервалась. Началась Великая Отечественная война. Ленинград оказался в кольце блокады. В октябре 1941 года Молчанов в числе двух с половиной тысяч заключенных был этапирован из Ленинграда и, по официальным данным, погиб при эвакуации через Ладожское озеро. Посмертно реабилитирован 28 сентября 1954 года постановлением Главной военной прокуратуры.

В 1944 году во время отступления фашисты взорвали Павловскую обсерваторию. Советским правительством было принято решение ее не восстанавливать, а перевести в другое место. После полного снятия блокады Ленинграда в 1944 году для воссоздания научно-

экспериментальной базы ГГО был выбран поселок Сельцы Ленинградской области (ныне пос. Воейково), где впоследствии и были продолжены аэрологические исследования.

Аэрология, которой всю свою короткую, но яркую творческую жизнь посвятил выдающийся ученый Павел Александрович Молчанов, получила дальнейшее развитие в нашей стране и вышла в космос.

Павел Александрович Молчанов является основоположником отечественной аэрологии и одним из крупнейших ученых-метеорологов. Им было опубликовано свыше ста научных работ. Под руководством Молчанова была воспитана целая плеяда ученых: по аэроклиматологии — В. М. Михель и Е. С. Селезнева, по авиационной метеорологии — П. А. Воронцов и Л. Л. Рупперт, по аэрологии — Н. Н. Шпаковский и И. Г. Гутерман, по вопросам термодинамики атмосферы — Е. А. Кропотов, А. А. Молодецкий, Д. Л. Лайтман и А. П. Чуваев.

С 1975 года имя П. А. Молчанова носит одна из улиц города Павловска. В 1983 году в СССР было спущено на воду океанографическое научно-исследовательское судно ледового плавания «Профессор Молчанов». 26 января 1983 года по 7 сентября 1991 года судно совершило 34 похода в северных широтах, включая три глобальные гидрологические экспедиции.

После реконструкции начиная с 2012 года на судне проводятся ежегодные экспедиции в рамках проекта Северного (Арктического) федерального университета «Плавающий университет».



Сотрудники Павловской магнитно-метеорологической обсерватории.
Во втором ряду: третий слева — П. А. Молчанов.



Сотрудники Института Аэрологии, Павловск (тогда г. Слуцк) 1932 г.
Во втором ряду в центре — П. А. Молчанов.



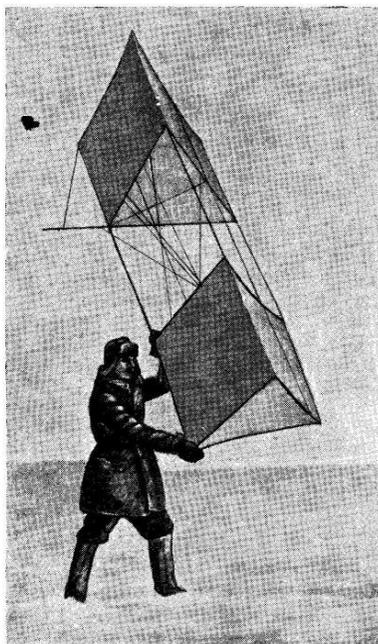
П. А. Молчанов (крайний справа в первом ряду) демонстрирует радиозонд в АН СССР.



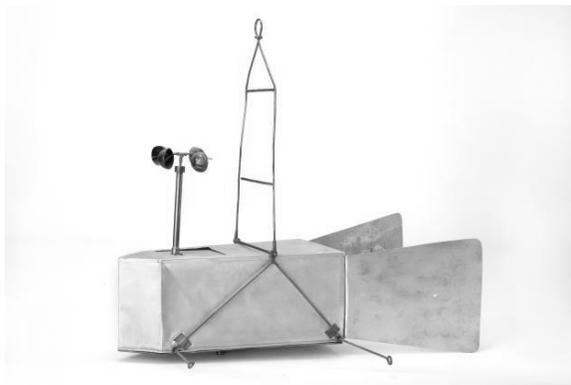
26 июля 1931 года, Комендантский аэродром, Ленинград.
Советские ученые Р. Л. Самойлович и П. А. Молчанов
в гондоле дирижабля «Граф Цепелин» вместе с командиром
экипажа дирижабля Хуго Эккенором.



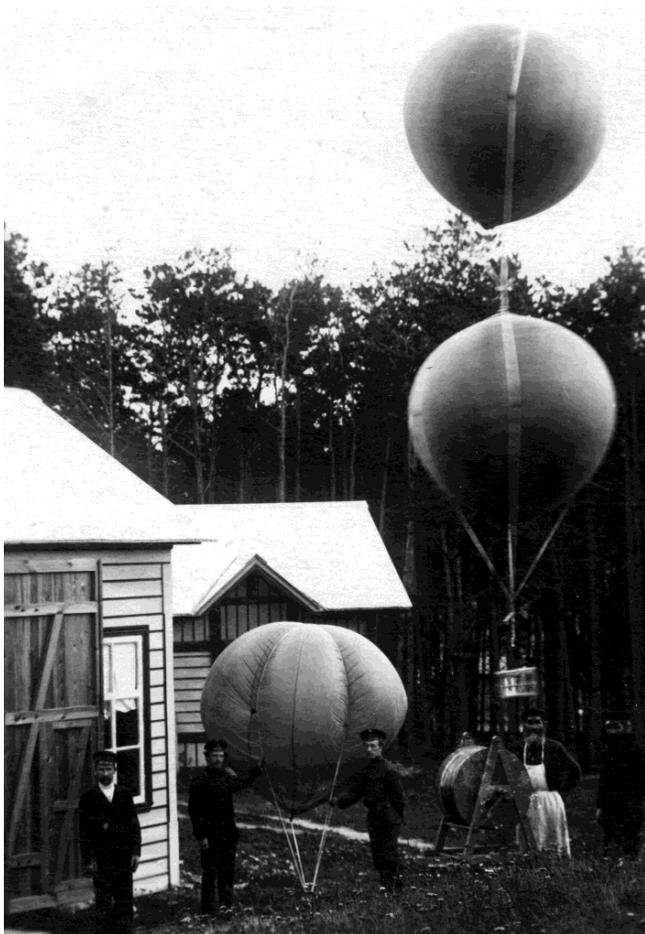
Июль 1931 года. Запуск радиозонда с дирижабля «Граф Цепелин».
Съемка из мотогондолы дирижабля.



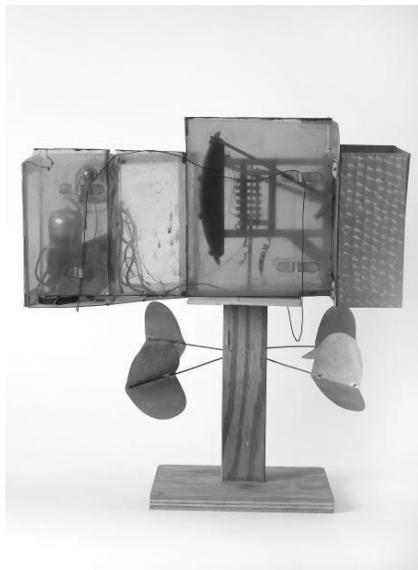
Аэрологический змей конструкции П. А. Молчанова перед подъемом.



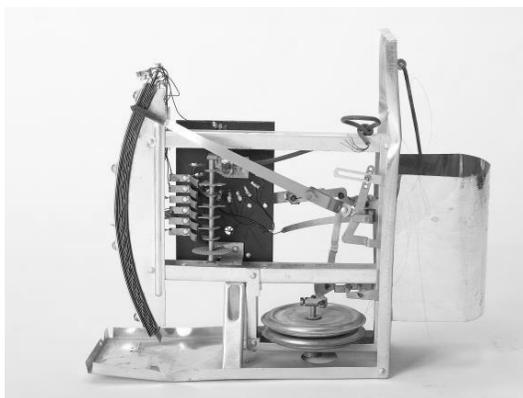
Метеорограф В. В. Кузнецова.
Изготовлен в мастерских Павловской обсерватории.



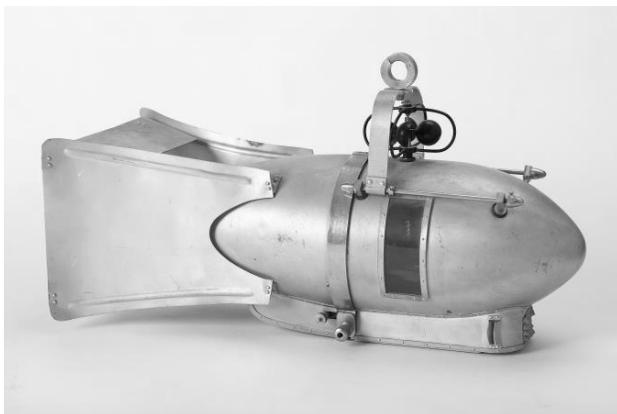
Запуск метеорографа в Екатеринбургской обсерватории.



Гребенчатый радиозонд П. А. Молчанова (внутреннее устройство).
Изготовлен в Институте аэрологии ГГО в 1929—1930 гг.



Гребенчатый радиозонд П. А. Молчанова (внутреннее устройство).
Предназначен для измерения температуры, давления, влажности воздуха.
Поднимался шаром-пилотом. Изготовлен предположительно в 1937—1932 гг.



Аэростатный метеорограф.

Предназначен для зондирования пограничного слоя атмосферы.

Разработан П. А. Молчановым и Воронцовым.

Изготовлен на Государственном заводе метеоприборов в Ленинграде в 1939 г.

УДК 551.509

Особенности эволюции конвективных облаков и осадков в условиях сильного аэрозольного загрязнения атмосферы, вызванного лесными пожарами. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Торопова М. Л., Синькевич А. А., Куров А. Б., Волков Н. Н., Игнатьев А. А. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 7—27.

Приведены результаты работ по численному моделированию эволюции конвективных облаков и связанных с ними осадков в условиях сильного аэрозольного загрязнения атмосферы сажей и золой при лесных пожарах. Исследовались случаи развития конвективных облаков на фоне задымления атмосферы в регионах Восточной Сибири и Центрального Китая. Для случая Восточной Сибири получено, что сажа и зола способствуют формированию осадков из облаков, которые при отсутствии задымления практически не выпадают. Для случая Центрального Китая получено, что аэрозольное загрязнение оказывает слабое влияние на эволюцию облаков и осадков, так как влияет только на характеристики верхней части облака.

Ключевые слова: конвекция, облако, осадки, лесной пожар, аэрозоль.

Ил. 6. Табл. 5. Библ. 9.

УДК 551.576.11+551.594.2

Численное моделирование электрических процессов в грозовых облаках.
Шаповалов В. А. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 28—36.

Представлено описание расчета электрических параметров в разработанной трехмерной нестационарной математической модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Приведены некоторые результаты расчетов потенциала и напряженности электрического поля в грозовом облаке на разных стадиях развития. Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска, микрофизический блок на основе использования кинетических уравнений для функций распределения частиц по массам описывает процессы: нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, а также взаимодействие облачных частиц под влиянием электрического поля облака.

Ключевые слова: конвективное облако, трехмерная модель, электризация частиц, электрический заряд, напряженность поля, численные эксперименты.

Ил. 1. Библ. 12.

УДК 537.867+523.034.43

О возможности применения беспилотных летательных аппаратов для исследований напряженности электрических полей в атмосфере.
Торгунаков Р. Е. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 37—46.

Проанализированы возможности использования средневысотных беспилотных летательных аппаратов большой продолжительности полета в качестве платформы для измерения напряженности электрических полей в атмосфере. При помощи методики физико-математического моделирования электростатических полей произведен расчет и анализ матриц калибровочных коэффициентов для нескольких вариантов расположения датчиков на борту БПЛА.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, заряд, беспилотный летательный аппарат, БПЛА, самолет-лаборатория.

Табл. 3. Ил. 4. Библ. 8.

УДК 551.594

Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе. Зайнетдинов Б. Г. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 47—61.

Представлены результаты исследований параметров атмосферного электричества для условий хорошей погоды на полярных станциях атмосферно-электрической наблюдательной сети. Выделены суточные и годовые вариации атмосферно-электрических характеристик.

Ключевые слова: атмосферно-электрические характеристики, напряженность электрического поля атмосферы, суммарная электрическая проводимость воздуха, суточные и годовые вариации.

Ил. 9. Библ. 3.

Влияние пространственного разрешения на качество воспроизведения сильных осадков в модели WRF-ARW: пример - юго-запад Ирана. Маддах М. А., Русин И. Н., Ахунд-Али А. М. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 62—85.

На примере орографически сильно неоднородной территории юго-западе Ирана рассматривается влияние пространственного разрешения модели WRF-ARW на качество прогноза суточных интенсивных осадков. Были использованы восемь типов домена с различным пространственным разрешением (из них четыре с применением параметризация конвекции (ПК) и четыре контрольные без использования ПК в домене с самым высоким разрешением DO3) для десяти дат (80 численных экспериментов), когда выпадали сильные осадки. С помощью статистических индексов оценивалась результативность каждого эксперимента во внешнем (DO1) и внутренних доменах (DO2 и DO3) модели по разным градациям осадков. В результате выяснилось, что наименьшие ошибки при прогнозе слабых и умеренных осадков получаются в домене DO3 с пространственным шагом 4 км без использования ПК. Но для сильных и очень сильных осадков наилучшие результаты получены в домене DO3, если шаг сетки равен 6 км и параметризация конвекции использована. Увеличение шага сетки и включение параметризации конвекции особенно сильно повлияло на улучшение качества прогнозов в градации очень сильных осадков.

Ключевые слова: модель WRF-ARW, моделирование осадков, пространственное разрешение, параметризация конвекции, юго-запад Ирана.

Ил. 6. Табл. 3. Библ. 25.

УДК 551 006.92 (47+57)

О состоянии и функционировании автоматизированных метеорологической и актинометрической сетей в 2017 году.

Гаврилова С. Ю., Иванова Т. А., Луцько Л. В., Ерохина А. Е., Махоткин А. Н., Коломеец Л. И., Садыкова А. Ф. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 86—109.

Изложены основные результаты мониторинга функционирования и состояния автоматизированных метеорологических и актинометрических комплексов, а также автоматических метеорологических станций за 2017 г., установленных на метеорологической наблюдательной сети Росгидромета в период с 2009-2012 гг. Проанализированы состав, состояние технического обеспечения метеорологической и актинометрической сетей, качество передачи и кодирования оперативных сообщений в коде КН-01 и WAREP. Выявлены основные причины непоступления информационных сообщений в центры сбора данных. Сформулированы основные методические рекомендации по повышению качества и эффективности работы автоматизированных метеорологических и актинометрических сетей.

Ключевые слова: мониторинг, автоматизированная наблюдательная сеть, автоматизированный метеорологический комплекс, автоматизированный актинометрический комплекс, автоматическая метеорологическая станция, показатель уровня эффективности.

Табл. 3. Ил. 10.

УДК 551.521.9

Режим естественной освещенности различно ориентированных вертикальных поверхностей по данным наблюдений в МО МГУ.

Горбаренко Е. В., Шиловцева О. А., Сошинская И. В. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 110—123.

Проанализированы результаты временной изменчивости естественной освещенности различно ориентированных вертикальных поверхностей по данным наблюдений в МО МГУ за период 2014–2017 гг. Приведены значения освещенности вертикальных поверхностей, ориентированных на север, восток, юг и запад при разных погодных условиях. Получены соотношения между освещенностью горизонтальной и вертикальных поверхностей. Результаты полученных наблюдений представляют интерес для оценки естественного освещения внутри помещения.

Ключевые слова: освещенность, строительные нормы, освещенность стен, естественный свет.

Табл. 1. Ил. 6. Библ. 7.

УДК 551.594

К расчету электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды». Кашлева Л. В., Баранова М. Е., Михайловский Ю. П. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 124—138.

В статье предложен способ расчета электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды». Для анализа использована одномерная модель электрической структуры атмосферы. Были рассчитаны вертикальные профили напряженности электрического поля, проводимости атмосферы, концентрации и подвижностей ионов, их подвижностей, плотности объемного заряда атмосферного воздуха, распределение по высоте объемного заряда вертикального столба атмосферы единичного сечения тропосферы и плотность поверхностного заряда Земли. Показано, что проведенные расчеты согласуются с имеющимися данными, представленные в литературе. Это позволяет использовать представленную модель для построения профилей электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды».

Ключевые слова: электрические параметры тропосферы, условия «хорошей погоды».

Ил. 8. Библ. 10.

УДК 551.501.81

Метод повышения эффективности сопоставления радиолокационной и наземной информации. Жарашуев М. В., Гергоков А. Х., Кагермазов А. Х., Макитов В. С., Созаева Л. Т. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 139—149.

Предлагается новая концепция автоматического сравнения радиолокационной и наземной информации с использованием сети метеостанций Росгидромета. Приводится пример использования данной методики для конкретного случая ДМРЛ-С в Ставрополе и Волгограде. Подтверждаются известные и описываются новые причины расхождения в показаниях наземных и радиолокационных данных.

Ключевые слова: метеостанция, радиолокация, автоматизация, сравнение, статистика.

Ил. 3. Библ. 7.

Появление чужеземных тропических видов комаров *Aedes* на юге России – оценка риска здоровью населения с учетом климатических и эпидемиологических факторов. Ясюкевич В. В., Ясюкевич Н. В. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 150—163.

В России (Черноморское побережье Кавказа) были обнаружены желтолихорадочный комар *Aedes aegypti* и азиатский тигровый комар *Ae. albopictus*. Появление высокоэффективных переносчиков тропических лихорадок создает предпосылки для возникновения эпидемических вспышек таких опасных заболеваний, как желтая лихорадка, лихорадки Денге, Чикунгунья, Зика на территории России. Существующие климатические предпосылки к распространению по территории России *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus* в настоящее время пока не реализованы. Риск возникновения эпидемических вспышек тропических лихорадок, связанных с *Ae. aegypti* и *Ae. albopictus*, в настоящее время очень мал. В дальнейшем, по мере возможной реализации климатических предпосылок, способствующих распространению комаров этих видов, риск может существенно увеличиться.

Ключевые слова. *Aedes aegypti*, *Ae. albopictus*, арбовирусные инфекции, климатические предикторы, модельный климатический ареал, климатический сценарий.

Ил. 1. Библ. 33.

УДК 551.5

Памяти И. М. Имянитова. Михайловский Ю. П., Кашлева Л. В., Морозов В. Н. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 164—178.

Статья посвящена памяти известного геофизика И. М. Имянитова, исследователя атмосферного электричества, разработчика приборов и методов измерения электрических полей в атмосфере и облаках. В воспоминаниях его сотрудников и учеников показана его роль и значение в организации исследований электрических свойств облаков. Показано, что некоторые идеи и начинания Имянитова продолжают жить и развиваться в трудах его учеников.

Ключевые слова: атмосферное электричество, облака, методы измерения.

Ил. 6.

УДК 551.5

Прорыв в стратосферу. Хайруллин К. Ш. Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 179—194.

Статья посвящена истории развития аэрологических наблюдений в России. Показана роль выдающегося отечественного геофизика П. А. Молчанова, создателя первого в мире радиозонда, в развитии аэрологии.

Ключевые слова: аэрология, гребенчатый радиозонд, наблюдения.

Ил. 11.

Peculiarities of convective clouds and precipitation evolution during strong aerosol atmosphere pollution due to forest fires. Dovgalyuk Yu. A., Veremey N. E., Toropova M. L., Sinkevich A. A., Kurov A. B., Volkov N. N., Ignatiev A. A. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 7—27.

Results of numerical simulation of evolution of convective clouds and precipitation formed by them in the conditions of severe aerosol pollution of the atmosphere by soot and ash due to forest fires are presented. Cu development cases, observed in Eastern Siberia and Central China, are investigated. For the case of Eastern Siberia it is obtained that soot and ash contribute to precipitation formation which does not occur without aerosol pollution. For Central China it is obtained that aerosol pollution weakly affects clouds and precipitation evolution. It affects cloud top characteristics only.

Keywords: convection, cloud, precipitation, forest fire, aerosol.

Fig. 6. Tab. 5. Ref. 9.

Numerical simulation of electrical processes in storm clouds. Shapovalov V.A. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 28—36.

The paper presents a description of the calculation of electrical parameters in the developed three-dimensional non-stationary mathematical model of the convective cloud with detailed account of thermodynamic, microphysical and electrical processes. Some results of calculations of the electric field potential and intensity in the storm cloud at different stages of development are presented.

Hydrothermodynamic block model consists of the equations of motion that describe moist convection in the Boussinesq approximation, microphysical unit based on the use of kinetic equations for the distribution functions of particle mass describes the processes: nucleation, condensation, coagulation of the droplets with the droplets, sublimation, accretion, freezing droplets and the interaction of cloud particles under the influence of the electric field of the cloud.

Keywords: convective cloud, three-dimensional model, electrification of particles, electric charge, field intensity, numerical experiments.

Fig. 1. Ref. 12.

On the possibility of application of unmanned aerial vehicles for the study of electric fields strength of the atmosphere. Torgunakov R. E. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 37—46.

The author analyzes the possibility of using medium-altitude long-endurance (MALE) unmanned aerial vehicles as a platform for measuring the strengths of electric fields in the atmosphere. Using the methodology of physical and mathematical modeling of electrostatic fields, the matrixes of calibration coefficients have been calculated and analyzed for several variants of the arrangement of sensors onboard of the UAV.

Keywords: electrical field strength, charge, unmanned aerial vehicle, UAV, flying test-bed.

Tab. 3. Fig. 4. Ref. 8.

УДК 551.594

Results from observations of the atmospheric surface layer's electricity properties in the polar region. Zainetdinov B. G. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 47—61.

Shown are results of an analysis of atmospheric electricity parameters based on observations collected from a network of polar observational stations under optimal weather conditions. Diurnal and annual variations of those parameters have been selected and presented.

Keywords: atmospheric-electrical characteristics, the electric field of the atmosphere, total electrical conductivity of air, diurnal and annual variations.

Fig. 9. Ref. 3.

The effect of horizontal resolution on heavy rainfall simulation quality in the WRF-ARW model: Case study - southwest of Iran. Maddah M. A., Rusin I. N., Akhoond-Ali A. M. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 62—85.

This study addresses the impact of various horizontal resolutions (HR) and their interactions on forecasts quality for daily heavy rainfall, which adopts the Weather Research and Forecasting (WRF) model, using Advanced-Research WRF (ARW) core, in southwestern Iran. For this purpose, eight different experiment types of the 3-nested domain (D01, D02 and D03) are considered, four of which are using convective parameterization (CP) on their fine resolution domain, i.e. D03. Each experiment type is examined for 10 selected dates, which results in 80 total experiments in total. The performance and efficacy of each experiment types in the triply determined nested domains for different rainfall thresholds are evaluated using statistical indices. For light and moderate rain thresholds, the experiment with 4-km HR (in D03) without CP emerges as the domain having the least error. Furthermore, for heavy and extreme rain thresholds, the experiment with 6-km HR (in D03) shows adequate results. It should be noted that the light and moderate rainfalls are better described in the absence of CP. Our results also demonstrate that CP particularly improves the quality of forecasts in the event of extreme precipitation thresholds.

Keywords: WRF model, rainfall modeling, horizontal resolution, convective parameterization, southwest of Iran.

Fig. 6. Tab. 3. Ref. 25.

Automated meteorological and solar radiation networks state and functioning overview in 2017 year. Gavrilova S. Y., Ivanova T. A., Lutsko L.V., Erohina A. E., Makhotkin A. N., Kolomeets L.I., Sadikova A. F. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 86—109.

It have been presented the main results of automated meteorological/solar radiation complexes and automatic stations state and functioning monitoring for 2017 year, established at the meteorological observational network of Roshydromet in the period from 2009-2012. In actual paper it have been analyzed composition, technical state of automated meteorological and solar radiation networks, quality transfer messages and coding of operational meteorological information in the codes of KN-01 and WAREP data. It have been verified main causes of non-receiving operational messages to data collection centers. It have been given some methodical recommendations to increase the automated meteorological and solar radiation networks efficiency

Keywords: monitoring, automated monitoring network, automated meteorological complex, solar radiation automated complexes, automatic meteorological station, efficiency measure coefficient.

Tab 3. Fig.10.

The natural illuminance mode of differently oriented vertical surfaces according to Moscow State University observations. Gorbarenko E. V., Shilovtseva O. A., Soshinskaya I. V. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 110—123.

The results of natural illuminance temporal variability for differently oriented vertical surfaces have been analyzed based on Moscow State University observations for the period of 2014–2017. The values for illuminance of the north-, east-, south-, and west-oriented vertical surfaces under various weather conditions are provided. The correlations between illuminance of the horizontal surface and each of the vertical surfaces have been obtained. The results of the above observations are of interest for indoor lightening evaluation.

Keywords: illuminance, building regulations, wall illuminance, daylighting, natural light.

Tab. 1. Fig. 6. Ref. 7.

On calculations of electrical parameters of troposphere in the conditions of “fair weather”. Kashleva L. V., Baranova M. E., Mikhailovskii Yu .P. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 124—138.

The article presents the method of calculations of electrical parameters of troposphere in the conditions of “fair weather”. The one-dimension model of electric structure of atmosphere is used. There were calculated the following parameters: electric field strength, conductivity of the atmosphere, ions concentrations and mobility, the volume density of the air. It is shown that the results of calculations agree with data of observations.

Keywords: electrical parameters of troposphere, the conditions of “fair weather”.

Fig. 8. Ref. 10.

Method of increasing the efficiency of the mapping radar and ground information. Zharashuev M. V., Gergokov A. K., Kagermazov A. Kh., Makitov V. S., Sozaeva L. T. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 139—149.

The article proposes a new concept, automatic comparison of radar and terrestrial information using a single network of certified meteorological stations of Roshydromet. An example of the use of this technique for a specific case, DMRL-S in Stavropol and Volgograd is given. Confirmed known and described new reasons for the discrepancy in the testimony of terrestrial and radar data.

Keywords: weather station, radar, automation, comparison, statistics.

Fig. 3. Ref. 7.

The emergence of foreign tropical species of aedes mosquitoes in the South of Russia – assessment of health risk, taking into account climatic and epidemiological factors. Yasjukevich V. V., Yasjukevich N. V. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 150—163.

In Russia (Black Sea coast of Caucasus) was discovered the yellow fever mosquito *Aedes aegypti*, and the Asian tiger mosquito *Ae. albopictus*. The advent of high performance of vector control tropical fevers creates prerequisites for occurrence of epidemic outbreaks of such dangerous diseases as yellow fever, Dengue fever, Chikungunya, zika on the territory of Russia. Existing climatic background to the spread on the territory of Russia *Ae. aegypti* and *Ae. albopictus* is currently not yet implemented. The risk of outbreaks of tropical fevers associated with *Ae. aegypti* and *Ae. albopictus*, is currently very small. In the future, as the possible implementation of climate prerequisites that contribute to the spread of mosquitoes of these species, the risk can increase significantly.

Keywords. *Aedes aegypti*, *Ae. albopictus*, arthropod-borne infections, climatic predictors, model the climate of the area, climatic scenario.

Fig. 1. Ref. 33.

In memory of I. M. Imyanitov. Mikhailovskii Yu. P., Kashleva L.V., Morozov V. N. Proceedings of the GGO. 2018. V. 588. P. 164—178.

The article is dedicated to the memory of the famous geophysicist I. M. Imyanitov, the researcher of atmospheric electricity, the developer of instruments and methods of measuring electric fields in the atmosphere and clouds. His role and importance in organizing research of the electrical properties of clouds are shown in the memoirs of his collaborators and followers. It is shown that some ideas and beginnings of I. M. Imyanitov continue to live and develop in the writings of his followers.

Keywords: atmospheric electricity, clouds, measurement methods.

Fig. 6.

Breakthrough into the stratosphere. Khairullin K. Sh. Proceedings of MGO. 2018. V. 588. P. 179—194.

The article is devoted to the history of development of aerological observations in Russia. The role of the outstanding Russian geophysicist P.A. Molchanov, the creator of the world's first radiosonde, in the development of aerology is shown.

Keywords: aerological observations, radiosonde, measurement methods.

Fig. 11.

Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 588

Подписано в печать 5.06.18. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 13,25. Тираж 300 экз. Заказ №6120.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ». 195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28Ц, оф. 1Н.