

Федеральная служба  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. Воейкова

Выпуск

**587**

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

Санкт-Петербург  
2017

---

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
Телефон: (812) 297-43-90  
ФАКС: (812) 297-86-61  
e-mail: [director@main.mgo.rssi.ru](mailto: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»,  
2017

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю. П. Михайловский, Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей, А. А. Синькевич.</i> К использованию численной модели конвективного грозового облака для изучения роли электрических сил в образовании опасных явлений погоды. ....	7
<i>Р. Е. Торгунаков, Ю. П. Михайловский, А. А. Синькевич.</i> Самолетные исследования напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках на ранней стадии развития. ....	32
<i>В. А. Колбин, А. Д. Кузнецов, О. С. Сероухова, Т. Е. Симакина, А. С. Солонин.</i> Некоторые результаты исследования процесса слияния конвективных ячеек над территорией Ленинградской области. ....	47
<i>А. В. Шавлов, В. А. Джуманджи, А. А. Яковенко.</i> Заряд капель воды при испарении и конденсации. ....	56
<i>И. Л. Кароль, А. А. Киселев.</i> Радиационные и температурные индексы (метрики) современных антропогенных изменений климата. ....	79
<i>Н. Ш. Вольберг, А. А. Успенский, И. Г. Гуревич, А. В. Степаков.</i> Простой метод получения микропотоков газов для контроля погрешности методик количественного химического анализа воздуха (на примере формальдегида, фтористого водорода и фенола). ....	96
<i>Л. В. Кашлева, Нго Динь Хи, Ю. П. Михайловский.</i> О контроле осадков из конвективных облаков по радиолокационным параметрам. ....	105

<i>Л. Г. Соколенко, П. Л. Стерхов.</i> Годовые вариации напряженности электрического поля атмосферы и полярных электрических проводимостей воздуха по данным измерений на станции Восток. ....	116
<i>О. В. Трофимова, В. А. Задворных.</i> Косвенные методы расчета суммарной солнечной радиации для оценки гелиоэнергетических ресурсов региона на примере Якутии. ....	125
<i>И. Н. Плахина, Н. В. Панкратова, Е. Л. Махоткина.</i> Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы в Приморье по наземным и спутниковым данным. ....	137
<i>Г. И. Мазуров, В. И. Акселевич.</i> Анализ причин возникновения сильных пожаров в Красноярском крае и их связи с метеорологическими параметрами. ....	153
<i>М. А. Березина, О. В. Волобуева, Я. В. Дробжева, В. И. Дробжев.</i> Проверка модели влажности воздуха в северном полушарии (ГОСТ 26352-84) на основе аэрологических данных. ....	173
<i>В. В. Мелентьев.</i> Профессор К. С. Шифрин — основоположник пассивной СВЧ-микроволновой радиометрии (радиотеплолокации). ....	204
Павел Николаевич Тверской (к 125-летию со дня рождения). ....	228

## CONTENTS

<i>Mikhailovsky Yu. P., Dovgaluk Yu. A., Veremey N. E., Sinkevich A. A.</i> To the use of numerical model of thunderstorm to study the role electrical forces in formation of dangerous weather phenomena. ....	7
<i>Torgunakov R. E., Mikhailovskiy Yu.P., Sinkevich A. A.</i> Aircraft studies of the electric field strength and aircraft charge in convective clouds at the early stage of development. ....	32
<i>Kolbin V. A., Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S., Simakina T. E., Solonin A. S.</i> Some results of the investigation of the process of mergers of convective cells over the territory of the Leningrad region. ....	47
<i>Shavlov A. V., Dzhumadzhi V. A., Yakovenko A. A.</i> Charge of drops of water at evaporation and condensation. ....	56
<i>Karol I. L., Kiselev A. A.</i> Radiative and temperature indices (metrics) of modern anthropogenic climate changes. ....	79
<i>Vollberg N. Sh., Uspenski A. A., Gurevich I. G., Stepakov A. V.</i> A simple method for obtaining microflows of gases to control the errors in quantitative chemical air analysis techniques (for example, formaldehyde, hydrogen fluoride and phenol. ....	96
<i>Kashleva L. V., Ngo Dinh Hu, Mikhailovskii Yu. P.</i> About control of convective clouds precipitation using radar parameters. ....	105
<i>Sokolenko L. G., Sterkhov P. L.</i> Annual variations in tension of the electrical field of the atmosphere and the polar electrical conductivities for air measurement data at Vostok Station. ....	116
<i>Trofimova O. V., Zadvornyykh V. A.</i> Indirect calculation methods of global solar radiation for assessing solar energy resources of a region on the example of Yakutia. ....	125

<i>Plakhina I. N., Pankratova N. V., Makhotkina E. L.</i> Spatio-temporal variability of the aerosol optical thickness of the atmosphere in Primorye by terrestrial and satellite data. ....	137
<i>Mazurov G. I., Akselevich V. I.</i> Analysis of the causes of fires in the Krasnoyarsk Territory and their relationship to meteorological parameters. ....	153
<i>Berezina M. A., Volobueva O. V., Drobzheva Y. V., Drobzhev V. I.</i> Examination of the model of air humidity in the Northern Hemisphere, All Union State standard 26352-84 on the ground of aerological data. ....	173
<i>Melentyev V. V.</i> Professor Kusiel S. Shifrin as a pioneer of passive microwave radiometry. ....	204
Pavel N. Tverskoy . ....	228

**К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ  
КОНВЕКТИВНОГО ГРОЗОВОГО ОБЛАКА  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РОЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛ  
В ОБРАЗОВАНИИ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ**

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

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

Поступила в редакцию 03.11.2017

**Введение**

Опасные явления погоды, связанные с конвективными облаками (ливни, грозы, град, шквалы) наносят огромный ущерб различным отраслям хозяйства, а также представляют значительную опасность для человека. В последние годы в связи с наблюдающимися изменениями климата повторяемость таких явлений в разных частях земного шара неуклонно увеличивается (Горшков, 1995).

Указанные опасные явления возникают вследствие совокупности сложных и взаимосвязанных между собой процессов. Их возникновение связано с динамикой воздушных потоков в облаке и околооблачном пространстве, а также фазовыми и микроструктурными преобразованиями влаги.

Известно, что как гидродинамические, так и микрофизические облачные процессы в значительной степени зависят от электрических факторов. Облако представляет собой движущуюся ионизированную паровоздушную среду, содержащую заряженные взвешенные частицы (капли воды, частицы льда). Сам процесс облакообразования, т. е.

зарождения капель при конденсации водяного пара на ядрах конденсации, в значительной степени определяется зарядом и электрической структурой указанных ядер (Русанов и др., 1979). Последующий конденсационный рост капель зависит от заряда, находящегося на каплях, так как он влияет на насыщающее значение упругости водяного пара (Довгалюк, Ивлев, 1998; Гирс, Довгалюк, 1975).

Осадкообразование, с которым непосредственно связано возникновение опасных явлений погоды, также во многом зависит от электрических процессов. Взаимодействие капель между собой, а следовательно, и их коагуляционный рост зависят, в том числе, от их зарядов, а также от напряженности внешнего электрического поля (Шишкин, 1964; Мучник, 1974; Pruppacher, Klett, 1978; Кашлева, 2008). Электрические факторы также играют важную роль в процессе фазового перехода «вода — лед», что, в свою очередь, сказывается на осадкообразовании: критическая температура замерзания капель воды зависит от их зарядов (Русанов и др., 1979). Образование и выпадение осадков определяет процесс диссипации конвективного облака. Поскольку осадкообразование во многом взаимосвязано с электрическими процессами, следовательно, от них может зависеть продолжительность жизни облака и скорость его диссипации.

Отдельным вопросом является изучение образования зарядов и полей в облаке, то есть механизмов электризации облачных частиц и пространственного разделения зарядов. Эти механизмы можно подразделить на ионные, контактные, связанные с дроблением частиц и с коронными разрядами. Их подробный обзор дан в работах (Веремей и др., 2006, 2007; Морозов и др., 2009; Синькевич, Довгалюк, 2013; Кашлева и др., 2016).

Когда напряженность электрического поля в облаке или в подоблачном слое достигает величин порядка  $10^4 \div 10^5$  В/м, электростатическая сила, действующая на заряженные частицы осадков, становится сравнимой по порядку величины с силой тяжести и с уравнивающей ее силой сопротивления воздуха. В результате изменяется движение дождевых капель, а также частиц града и крупы.

В частности, возможно возникновение так называемой левитации (Довгалюк и др., 2013), когда под влиянием кулоновской силы осадки скапливаются на некоторой высоте.

К настоящему времени многообразие прямых и обратных связей между динамическими, микрофизическими и электрическими процессами в конвективном облаке изучено не в полной мере. В связи с этим тема работы является важной и актуальной с фундаментальной точки зрения. В прикладном же аспекте углубленное понимание механизмов возникновения опасных явлений погоды поможет усовершенствовать методы их прогноза, а также активных воздействий на облака с целью предотвращения или минимизации ущерба.

В данной работе для исследования облачных процессов используется метод численного моделирования. Для моделирования выбрана численная модель малой размерности, разработанная в ГГО (Довгалюк и др., 2013). Ее преимуществом по сравнению с трехмерной моделью является возможность сравнительно простой интерпретации получаемых результатов и оценки вклада того или иного процесса в эволюцию облака.

Данная модель является нестационарной. Ее микрофизический блок описывает микрофизические процессы в параметризованном виде. Она содержит уравнения движения, неразрывности, притока тепла, а также уравнения баланса водяного пара, облачных капель, дождевых капель, облачных ледяных кристаллов и градин. Система уравнений дополнена параметрическими выражениями для расчета интенсивности микрофизических процессов (фазовых переходов и коагуляции). Модель включает учет микрофизических процессов электризации частиц, переноса зарядов, переносимых различными субстанциями, а также формирования электрических полей. Микрофизический блок дополнен параметрическими выражениями для расчета интенсивностей процессов электризации облачных частиц при взаимодействии с ионами и между собой. Все физические величины осреднены по горизонтальному сечению цилиндра фиксированного радиуса, который задается в качестве параметра.

Детальное описание модели приведено в работе (Довгалюк и др., 2013). В данной работе мы остановимся на учтенных в модели аспектах взаимосвязи между электрическими процессами, с одной стороны, и динамикой и микрофизикой облака, с другой. Рассмотрим влияние электрических сил на интенсивность ливня и града.

## **1. Механизмы электризации облачных элементов, учтенные в численной модели**

На данный момент отсутствует полное и строгое теоретическое описание механизмов электризации облачных элементов. Это объясняется, во-первых, многообразием условий протекания электрических процессов, а во-вторых, наличием взаимосвязи между разными механизмами заряжения и укрупнения частиц. Эмпирические данные о знаке и величине зарядов, разделяемых в ходе многих процессов электризации, полученные разными авторами, чрезвычайно неоднозначны и противоречивы как в количественном, так и в качественном плане (Довгалюк и др., 2013; Мучник, Фишман, 1982; Веремей и др., 2006, 2007; Морозов и др., 2009). По этой причине при описании процессов генерации и разделения нескомпенсированных объемных электрических зарядов неизбежны упрощения.

Схема микрофизических процессов электризации облачных элементов, учтенных в используемой численной модели (Довгалюк и др., 2013), приведена на рис. 1 и 2.

В модели учтены следующие механизмы электризации:

- 1) диффузионный — заряжение частиц вследствие диффузии к этим частицам атмосферных ионов и их последующего захвата;
- 2) индукционный — особая разновидность диффузионного заряжения частиц, которое имеет место при селективном захвате атмосферных ионов частицами, поляризованными во внешнем электрическом поле;
- 3) суммирование зарядов взаимодействующих частиц при их коагуляции;

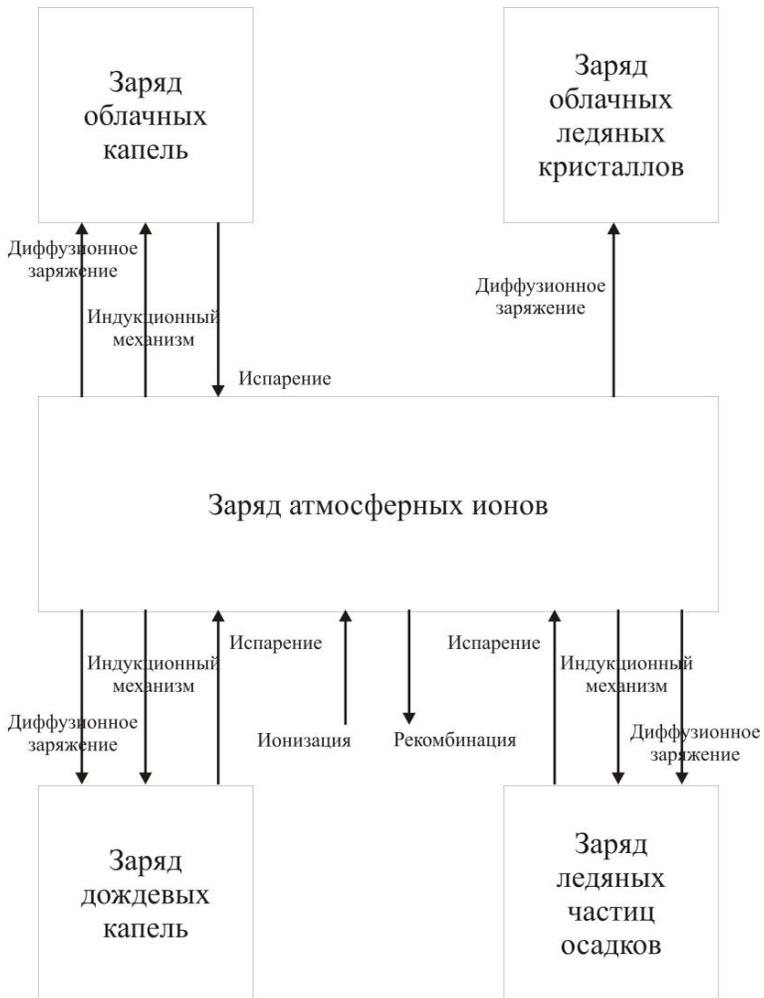


Рис. 1. Ионные механизмы электризации частиц.

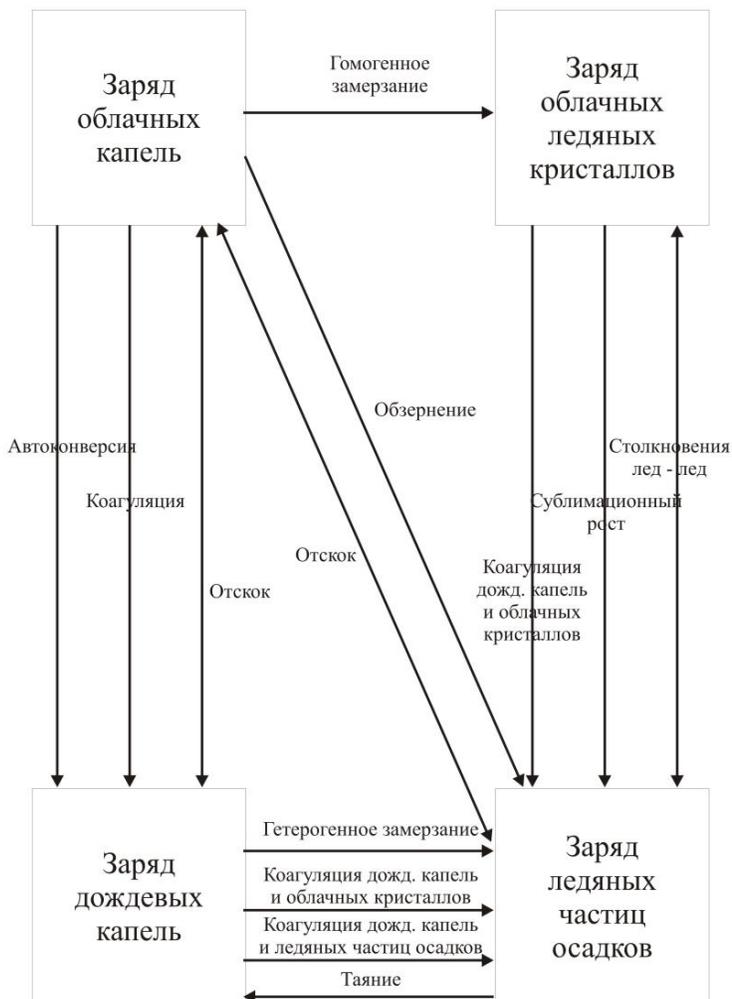


Рис. 2. Механизмы электризации частиц при их взаимодействии и при фазовых переходах влаги.

4) изменение количества заряда, переносимого частицами того или иного сорта, при фазовых переходах (включая переход заряда испаряющихся частиц в ионы);

5) разделение заряда при упругом взаимодействии (столкновение и отскок) дождевых капель либо тающих градин, с одной стороны, и облачных капель, с другой. При этом взаимодействующие частицы поляризованы во внешнем электрическом поле;

6) разделение заряда при упругом взаимодействии (столкновение и отскок) градин и облачных ледяных кристаллов.

Сравнительный анализ роли этих и других механизмов в процессе электризации конвективного облака изучался многими исследователями (Шишкин, 1964; Качурин, 1973; Мучник, Фишман, 1982; Никандров, 1981). Данные численного моделирования (Довгалюк и др., 2013) показывают, что ионные механизмы играют значительную роль при начальном формировании электрической структуры облака на стадии его развития. На более поздних стадиях подключаются контактные механизмы, связанные с взаимодействием облачных частиц между собой. Эти процессы, как правило, происходят с участием частиц осадков, так как они имеют значительную собственную скорость падения относительно облачных капель и кристаллов, движущихся вместе с воздушными потоками. Возникновение больших разделенных в пространстве нескомпенсированных объемных зарядов и сильных электрических полей, достаточных для образования молний, возможно только при образовании в облаке большого количества дождевых капель, градин и частиц крупы.

## **2. Учет влияния электрических процессов на динамику облака**

В процессе эволюции конвективного облака определяющим фактором является динамика конвективных движений воздуха. В связи с этим рассмотрим влияние электрических сил на динамику воздушных потоков.

Выпишем уравнение движения паровоздушной несущей среды, входящее в систему уравнений модели (Довгалюк и др., 2013):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} w|w| + \frac{2u_R}{R} (w - w_R) + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial w}{\partial z} \right) + g \frac{T_v - T_{v0}}{T_{v0}} - g(Q_c + Q_r + Q_i + Q_{ic}) - E_z \frac{\tau}{\rho_a}, \quad (1)$$

где  $w$  — вертикальная скорость;

$t$  — время;

$z$  — вертикальная координата;

$R$  — радиус цилиндрической области, в которой определено решение системы уравнений (радиус облака);

$\alpha$  — коэффициент турбулентного перемешивания на боковой границе цилиндра;

$u_R$  — радиальная составляющая скорости (слагаемое, которое его включает, описывает упорядоченный вток (отток) воздуха из окружающей среды (в окружающую среду));

$w_R$  — вертикальная скорость на границе цилиндра;

$\rho_a$  — плотность воздуха;

$K$  — коэффициент турбулентности в вертикальном направлении (здесь для простоты полагается, что он один и тот же для всех субстанций);

$g$  — ускорение свободного падения;

$T_v$  и  $T_{v0}$  — виртуальная температура внутри облачного цилиндра и во внешней среде соответственно;

$Q_c, Q_r, Q_i, Q_{ic}$  — отношение смеси облачных капель, дождевых капель, градин и облачных ледяных кристаллов соответственно;

$E_z$  — вертикальная составляющая вектора напряженности электрического поля;

$\tau$  — суммарная объемная плотность электрического заряда (ионов, капель и ледяных частиц в совокупности).

Последний член уравнения описывает силу, действующую со стороны электростатического поля на заряженную среду. Отметим, что даже в условиях хорошей погоды в атмосфере существует определенное количество ионов обоих знаков, а также фоновое электрическое поле, напряженность которого у подстилающей

поверхности составляет порядка  $10^2$  В/м. Объемная плотность нескомпенсированного заряда атмосферных ионов составляет порядка  $10^{-13}$  Кл/м<sup>3</sup>.

В процессе эволюции конвективного облака, в зависимости от степени его развития и конкретной атмосферной ситуации, абсолютная величина  $E_z$  в разных частях облака может изменяться по порядку величины в пределах  $10^1 \div 10^5$  В/м, а  $\tau$  — в пределах  $10^{-13} \div 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>. Это обусловлено процессами электризации облачных частиц и разделением объемных зарядов гравитацией и воздушными потоками. Облачные капли и кристаллы переносятся воздушными потоками вверх, а дождевые капли и градины оседают вниз под действием силы тяжести. Если в результате тех или иных процессов мелкие и крупные частицы приобретают заряд разного знака, то происходит разделение зарядов и увеличение напряженности электрического поля.

На предгрозовой стадии ( $E_z \sim 10^4 \div 10^5$  В/м,  $\tau \sim 10^{-9} \div 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>) значение последнего члена уравнения (1) (ускорение электростатической силы) становится сопоставимо со значением предпоследнего члена (сила тяжести, с которой взвешенные частицы оказывают давление на паровоздушную среду). Даже в хорошо развитом кучево-дождевом облаке суммарное отношение смеси конденсированной фазы, входящее в предпоследний член, редко превосходит  $10^{-2}$ . Таким образом, значение указанного члена не превышает  $10^{-1}$  м/с<sup>2</sup>. Такой же порядок имеет и предыдущий член, описывающий силу плавучести через разницу виртуальных температур. Последний же член уравнения для случая грозового облака может принимать значения порядка  $10^{-1} \div 10^1$  м/с<sup>2</sup>. Таким образом, электростатическая сила при определенных условиях способна влиять на динамику конвективных потоков, а через нее — на все облачные процессы.

### 3. Учет влияния электрических процессов на микрофизические процессы в облаке

Другим фактором, учтенным в модели, является влияние внешнего электрического поля и зарядов частиц на скорость их седиментации.

Собственная скорость падения дождевых капель и градин (для облачных частиц она пренебрежимо мала) играет большую роль в процессе эволюции облака и выпадающих из него осадков. Данная величина, наряду со скоростью вертикальных воздушных потоков, определяет, насколько быстро произойдет выпадение частиц осадков в подоблачный слой. Охлаждение воздуха при испарении осадков, а также давление их массы на воздушную среду в подоблачном слое приводят к подавлению восходящих потоков и разрушению облака. Таким образом, от скорости осаждения дождевых капель и градин зависит продолжительность жизненного цикла облака.

Помимо этого, скорость седиментации частиц влияет на интенсивность их гравитационной коагуляции. Коагуляция же является важнейшим процессом, определяющим фазовые и микроструктурные преобразования влаги в облаке, в том числе процесс осадкообразования. В свою очередь, образование и выпадение осадков неразрывно связано с возникновением опасных явлений погоды (ливни, грозы, град, шквалы).

Частицы осадков заряжены и находятся во внешнем электрическом поле, которое является суперпозицией полей, образуемых всеми зарядами, находящимися в облаке и подоблачном слое. Поэтому электростатическая сила неизбежно влияет на скорость седиментации частиц, а через нее — на возникновение опасных явлений погоды.

Положим, что установившаяся скорость падения частиц осадков есть результат равновесия трех сил: гравитационной ( $\vec{F}_G$ ), сопротивления воздуха ( $\vec{F}_D$ ) и воздействия электрического поля облака на заряженные частицы ( $\vec{F}_E$ ), то есть

$$\vec{F}_E + \vec{F}_D = \vec{F}_G \quad (2)$$

при 
$$\vec{F}_G = \frac{4}{3} \pi \rho_w r_r^3 \vec{g}, \quad (3)$$

$$\vec{F}_E = q_r \vec{E}, \quad (4)$$

$$\vec{F}_D = \frac{\pi}{2} r_r^2 C_D \vec{V}_r^2 \rho_a \vec{i}_z, \quad (5)$$

где  $\rho_w, \rho_a$  — плотность воды и воздуха соответственно;

$r_r$  и  $q_r$  — радиус и заряд единичной капли соответственно;

$g$  — ускорение свободного падения;

$E$  — напряженность электростатического поля;

$C_D$  — коэффициент сопротивления воздуха;

$\vec{V}_r$  — скорость седиментации капли;

$\vec{i}_z$  — единичный вектор, направленный противоположно  $\vec{V}_r$ .

По определению, число Рейнольдса  $Re$  есть

$$Re = \frac{2r_r V_r}{\nu}, \quad (6)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость. Тогда (5) представимо в виде:

$$\vec{F}_D = \frac{\pi}{8} Re^2 C_D \rho_a \nu^2 \vec{i}_z. \quad (7)$$

С учетом того, что число Беста (другое название — число Дэвиса) по определению есть (Ziv, Levin, 1974)

$$Bt = C_D Re^2, \quad (8)$$

формулу (7) можно представить в виде:

$$\vec{F}_D = \frac{\pi}{8} \text{Bt} \cdot \rho_a v^2 \vec{i}_z. \quad (9)$$

Объединяя (2) и (9), можно записать:

$$\frac{\pi}{8} \text{Bt} \cdot \rho_a v^2 \vec{i}_z = \vec{F}_G - \vec{F}_E.$$

Полагаем, что скорость седиментации частиц направлена строго вертикально. Поэтому рассматриваем вертикальные составляющие всех сил. В проекции на ось  $z$  получаем:

$$\text{Bt} = \frac{8}{\pi \rho_a v^2} \cdot \left| \frac{4}{3} \pi \rho_w r_r^3 g - q_r E_z \right|. \quad (10)$$

С другой стороны, существует эмпирическое соотношение, приводимое, например, в работе (Ziv, Levin, 1974), которое позволяет по известным значениям числа Беста найти значения числа Рейнольдса.

Тогда из (6) легко определить  $V_r$ , то есть

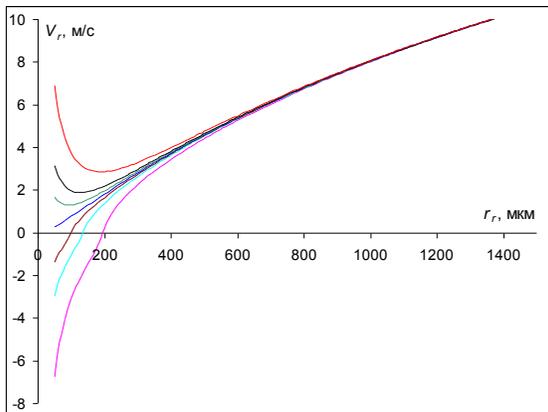
$$|V_r| = \frac{v \text{Re}(\text{Bt})}{2r_r}. \quad (11)$$

Знак  $V_r$  соответствует знаку выражения под знаком модуля в числителе (10). Иными словами, если электростатическая сила направлена вверх и превосходит по величине гравитационную, то и скорость седиментации будет направлена вверх (для  $V_r$  принято положительное направление — вниз, отрицательное — вверх).

На рис. 3 приведена рассчитанная по включенной в модель формуле (11) зависимость  $V_r$  от размеров дождевых капель при разных значениях напряженности электрического поля, которое

варьировалось от  $-3,0 \cdot 10^5$  до  $3,0 \cdot 10^5$  В/м. Заряд капли был задан равным  $10^{-12}$  Кл (рис. 3 а) и  $5,0 \cdot 10^{-13}$  Кл (рис. 3 б). Плотность воздуха, изменяющаяся с высотой, здесь для определенности полагалась равной  $0,8 \text{ кг/м}^3$ .

а)



б)

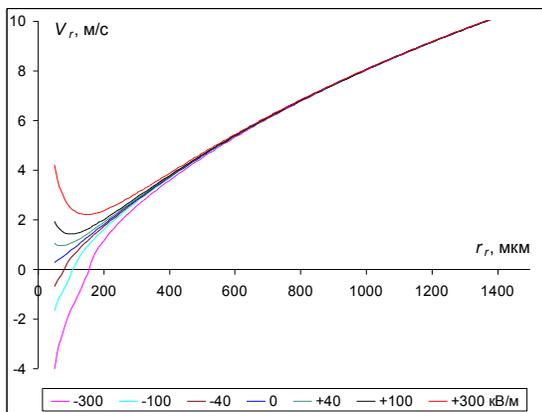


Рис. 3. Зависимость скорости седиментации дождевых капель от их размеров при разных значениях напряженности электрического поля.

Заряд частицы равен: а)  $1,0 \cdot 10^{-12}$  Кл; б)  $5,0 \cdot 10^{-13}$  Кл.

Температура воздуха  $0^\circ \text{C}$ , плотность воздуха  $0,8 \text{ кг/м}^3$ .

Из рисунков видно, что при радиусе капель более 400 мкм электрические факторы слабо влияют на осаждение капель. Однако для меньших размеров вклад кулоновской силы в движение частиц весьма заметен. Обратим внимание, что при определенном сочетании знаков заряда и поля, когда электростатическая сила направлена вверх,  $V_T$  может принимать отрицательные значения.

Для градин в модели используются те же формулы, что для дождевых капель, с заменой плотности воды на плотность льда.

Строго говоря, зависимость  $V_t$  от  $Re$ , аппроксимирующая экспериментальные данные для капель воды (Ziv, Levin, 1974), применительно к градинам нуждается в поправках. Это связано с тем, что, в отличие от капель воды, ледяные частицы не деформируются в воздушном потоке, а также сами по себе имеют более сложную геометрическую форму. В этом смысле в модели сделано определенное упрощение.

Скорость седиментации частиц влияет на коагуляцию, которая является определяющим механизмом роста массы осадков. Интенсивность гравитационной коагуляции частиц двух фракций, отличающихся размерами, пропорциональна модулю разности их скоростей седиментации. Поскольку в модели используется параметризованное описание микрофизических процессов, для каждой фракции берутся средневзвешенные значения указанных скоростей.

#### **4. Численное моделирование эволюции грозо-градового конвективного облака с учетом электрических процессов**

В качестве примера рассмотрим случай образования и развития грозо-градового конвективного облака над Пятигорском 29.05.2012 г. Это облако вызвало особо сильное градобитие, которое сопровождалось сильной грозовой активностью. Детальный анализ атмосферной ситуации, а также данные натуральных наблюдений за облаками и осадками и их трехмерного численного моделирования

приведены в работах (Синькевич и др., 2016, 2017; Михайловский и др., 2017).

Исследуем влияние электрических процессов на механизм осадкообразования в облаке методом численного моделирования с использованием модели малой размерности.

В табл. 1 приведены данные радиозондирования по ближайшей станции Минеральные Воды (37054). Анализ данных зондирования показал, что в основном облакообразующем слое конвективно-неустойчивые слои чередуются с задерживающими, поэтому требуется определенная энергия для преодоления последних.

Выполнено моделирование процесса образования и эволюции конвективного облака с помощью полуторамерной модели для температурно-влажностного строения атмосферы, приведенного в табл. 1.

*Таблица 1*

**Вертикальные профили температуры и влажности,  
полученные из данных радиозондирования 29 мая 2012 г.  
в срок 12 ч UTC по станции Минеральные Воды (37054)**

$p$ , ГПа	$T$ , °C	$T_d$ , °C	$p$ , ГПа	$T$ , °C	$T_d$ , °C
973	23,2	14,2	546	-11,9	-13,1
925	18,8	10,8	500	-15,5	-17,4
850	11,4	7,7	400	-28,1	-30,7
806	6,8	5,4	333	-38,5	-42,1
751	5,8	-2,2	300	-44,1	-47,7
700	1,0	-5,0	250	-54,1	-57,5
644	-4,0	-6,4	200	-56,1	-59,4
594	-5,9	-7,3	150	-50,5	-54,6

В табл. 2 приведены максимальные значения ряда характеристик облака, а также высота и время достижения максимумов (пока рассмотрим случай без учета электрических процессов).

Результаты моделирования показывают, что при указанной стратификации атмосферы образуется градовое кучево-дождевое

облако с верхней границей 9 км. Значения содержания капель и ледяных частиц соответствуют случаю хорошо развитого грозоградового облака. Интенсивность (на уровне подстилающей поверхности) дождя ( $I_r$ ) достигает 25,8 мм/ч, града ( $I_i$ ) — 8,6 мм/ч, суммарная интенсивность осадков ( $I_\Sigma$ ) — 32,7 мм/ч.

Следует отметить, что значения характеристик облака, рассчитанные по модели малой размерности, оказываются значительно меньше тех же характеристик, рассчитанных ранее по трехмерной модели (Синькевич и др., 2017). Это обусловлено осреднением всех физических величин по горизонтальным координатам, которое в трехмерной модели отсутствует.

Таблица 2

**Значения абсолютных максимумов  
ряда характеристик облака, а также высота и время их достижения  
без учета и при учете (в скобках) электрических процессов**

Параметр	Абсолютный максимум	Высота достижения	Время достижения
$w$ , м/с	15,8 (15,8)	5,4 (5,4)	18,8 (18,8)
$Q_c \cdot \rho_a$ , г/м <sup>3</sup>	2,17 (2,17)	3,8 (3,8)	13,3 (13,3)
$Q_r \cdot \rho_a$ , г/м <sup>3</sup>	2,08 (1,88)	0,4 (0,4)	25,3 (25,2)
$Q_i \cdot \rho_a$ , г/м <sup>3</sup>	2,29 (2,23)	3,2 (3,2)	20,7 (21,1)
$Q_{ic} \cdot \rho_a$ , г/м <sup>3</sup>	0,89 (0,92)	7,6 (7,6)	26,7 (27,4)
$I_r$ , мм/ч	25,8 (22,5)	—	26,0 (26,0)
$I_i$ , мм/ч	8,6 (7,5)	—	25,0 (25,0)
$I_\Sigma$ , мм/ч	32,7 (29,0)	—	25,0 (25,0)

Рассмотрим теперь эволюцию облака с учетом электрических процессов.

В первую очередь исследуем изменение напряженности электрического поля в зависимости от того, какие механизмы электризации учитываются при расчетах.

На рис. 4 приведен временной ход максимума (по модулю) вертикальной составляющей вектора напряженности электрического поля (здесь и далее горизонтальной его составляющей можно пренебречь).

Из рисунка видно, что ионные механизмы не могут обеспечить рост напряженности поля, достаточный для образования пробоя в виде молниевых разряда. Между тем, указанные механизмы важны на ранних стадиях эволюции зарядовой структуры облака. Совместный учет диффузионного и индукционного механизмов ослабляет электризацию облака по сравнению с учетом только индукционного механизма. Связано это с тем, что диффузия ионов к частицам способствует нейтрализации накопленного на них заряда.

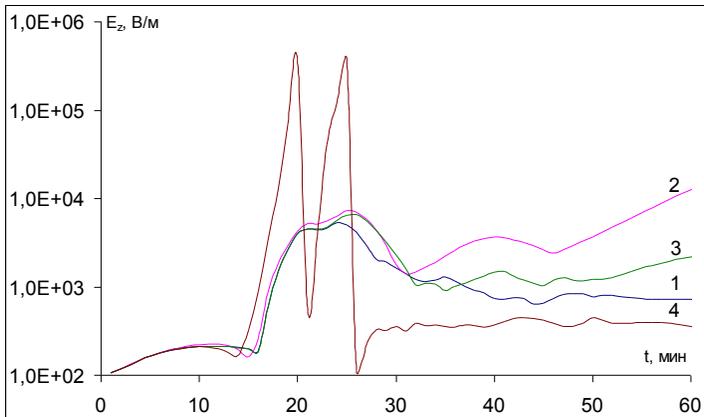


Рис. 4. Временной ход максимального по высоте значения модуля вертикальной составляющей напряженности электрического поля:

- 1 — при учете только диффузионного механизма электризации;
- 2 — только индукционного механизма;
- 3 — диффузионного и индукционного;
- 4 — всех механизмов.

Пробойное значение напряженности электрического поля (оно полагается равным  $5,0 \cdot 10^5$  В/м) достигается только при совместном учете всех микрофизических процессов электризации (диффузионный, индукционный, зарядение при отскоке частиц). Наиболее интенсивным из них является поляризационный — разделение зарядов сталкивающихся между собой тающих градин (дождевых капель) и облачных капель; при этом и те, и другие поляризованы во внешнем электрическом поле. Протекание данного процесса связано положительной обратной связью с ростом напряженности электрического поля, что и обуславливает его высокую эффективность. При этом грозовой разряд наблюдается дважды. В натуральных условиях количество разрядов оказывается существенно большим. Связано это с тем, что в модели упрощенно описан процесс нейтрализации зарядов и полей после молниевых разрядов.

Учет разделения зарядов при столкновении градин и ледяных кристаллов не вносит значительных изменений в картину электризации облака, так как частицы указанных фракций, как правило, разделены между собой в пространстве. Здесь сказывается параметризованное описание микрофизических процессов, которое не позволяет учесть многообразие размеров ледяных частиц. По-видимому, решением данной проблемы было бы введение дополнительной фракции твердых осадков (крупы).

Продолжение роста напряженности поля после распада облака обусловлено тем, что в модели не учтен процесс испарения облачных ледяных кристаллов. В связи с этим заряд, накопленный на них, не переходит в ионы.

Далее рассмотрим влияние электрических процессов на образование и выпадение осадков. Из табл. 2 видно, что при учете всех механизмов электризации максимальное значение водности дождевых капель и ледности градин несколько уменьшается (1,88 вместо 2,08 и 2,23 вместо 2,29 соответственно). На рис. 5 приведен временной ход интенсивности дождя, града и их суммарной интенсивности как при учете, так и без учета электрических процессов.

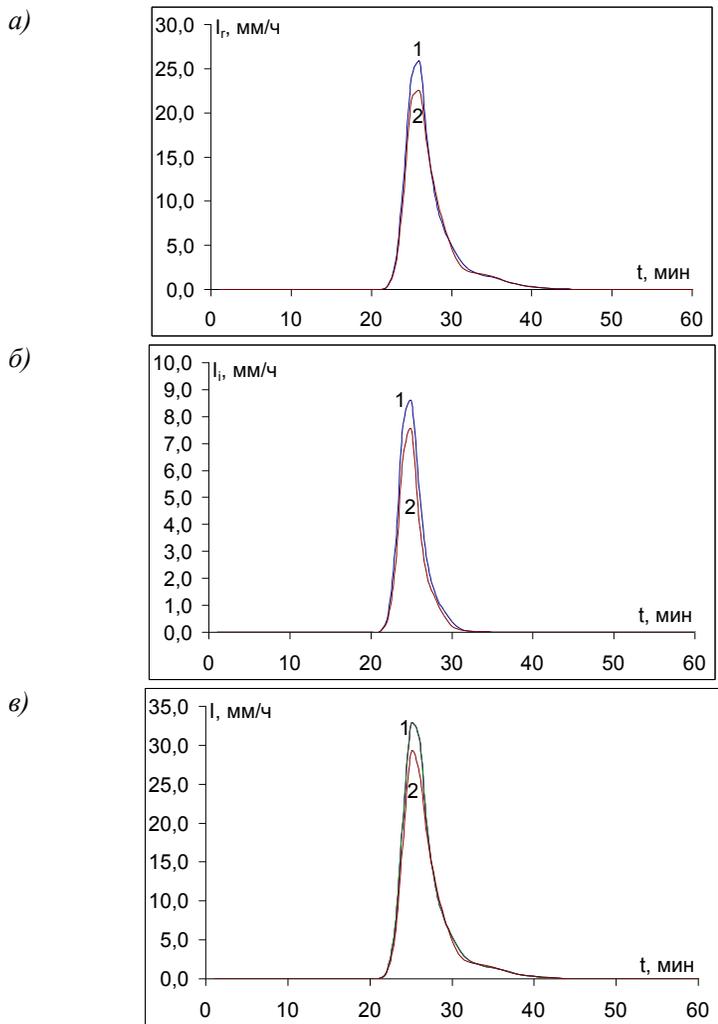


Рис. 5. Временной ход интенсивности дождя (а), града (б) и суммарной интенсивности дождя и града (в) у подстилающей поверхности:

- 1 — при отсутствии учета электрических процессов;  
 2 — при учете всех механизмов электризации частиц.

Из рис. 5 следует, что при учете электричества все интенсивности осадков несколько уменьшаются.

На рис. 6 приведен вертикальный профиль водности дождевых капель и ледности градин для момента времени  $t = 25$  мин, что соответствует максимуму интенсивности осадков у земли. Из рисунка видно, что электростатическая сила в некоторой степени деформирует профили водности и ледности. В данном случае содержание дождя и града несколько уменьшилось по сравнению со случаем отсутствия учета электричества.

Таким образом, электрические процессы несколько ослабили ливень и град. Следует отметить, что характер изменения характеристик осадков может существенно зависеть от знака заряда облачных частиц и осадков, а также направления вектора напряженности электрического поля в разных частях облака.

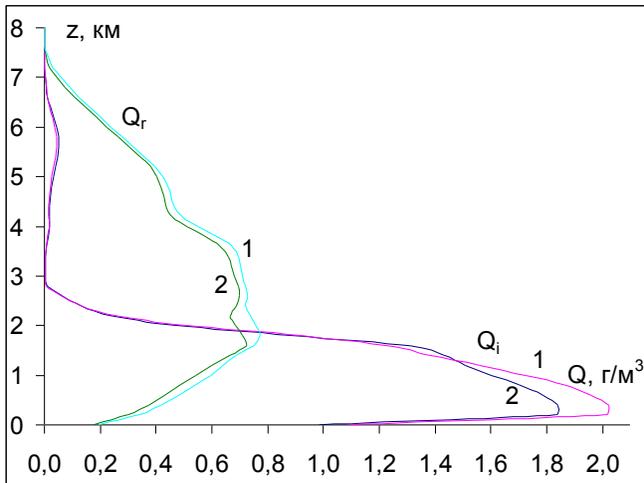


Рис. 6. Вертикальный профиль водности дождевых капель и градин в момент времени  $t = 25$  мин :

- 1 — при отсутствии учета электрических процессов;
- 2 — при учете всех механизмов электризации частиц.

## **5. Дальнейшие перспективы моделирования влияния электрических сил на облачные процессы**

Опыт создания и использования численных моделей, разработанных в ГГО, показал, что существует целый ряд направлений дальнейшего их усовершенствования. Это относится и к учету влияния электрических сил на процессы осадкообразования, термодинамику облака и формирование опасных явлений. Сказанное касается не только полуторамерной, но и трехмерной модели (Веремей и др., 2016), так как в ней используется практически тот же микрофизический блок.

Можно выделить следующие основные направления дальнейших работ по усовершенствованию модели:

1) Учет испарения облачных ледяных кристаллов и соответственно перехода их заряда в ионы в областях, где имеет место недосыщение водяного пара над льдом.

2) Учет электростатической составляющей при расчете скоростей седиментации облачных капель и ледяных кристаллов. Обычно эти скорости пренебрежимо малы, однако под влиянием электростатической силы они могут принимать существенные значения. Это оказывает влияние на интенсивность коагуляционных процессов.

3) Введение поправок для интенсивности замерзания капель воды в зависимости от их электрического заряда. При этом следует отдельно рассматривать гетерогенное замерзание дождевых капель, гомогенное замерзание облачных капель, а также замерзание любых капель воды при контакте с частицами льда.

4) Пересмотр разделения ледяных частиц по фракциям. В модели полезно предусмотреть введение фракции частиц крупы в дополнение к имеющимся фракциям облачных ледяных кристаллов и градин. При этом будет учтена контактная электризация при столкновениях градин и частиц крупы, которая играет существенную роль в процессе электризации облака. Частицы облачного льда и градин разнесены в пространстве и по этой причине практически не взаимодействуют между собой, а внутрифракционное взаимодействие при

параметрическом подходе не учитывается. Таким образом, в модели недооценивается роль механизма электризации «лед — лед».

5) Включение в систему уравнений механизма, описывающего роль коронных разрядов в облаке, приводящего к увеличению скорости ионообразования на 4 порядка, а также к появлению нового механизма возникновения твердой фракции (Синькевич и др., 2005; Синькевич, Довгалюк, 2013).

6) Верификация получаемых с помощью доработанных моделей результатов с использованием имеющихся экспериментальных самолетных и радиолокационных данных.

### **Заключение**

Рассмотрены механизмы влияния электрических сил на движение паровоздушной смеси и частиц осадков в облаке. Показано, что при значениях напряженности электрического поля, близких к пороговой напряженности молниевых разрядов, вклад электростатической силы в это движение сравним с вкладом других сил.

С помощью численной нестационарной полуторамерной модели конвективного облака выполнено моделирование развития грозоградового кучево-дождевого облака, давшего сильное градобитие в районе г. Пятигорска 29.05.2012 г.

В модели учтено влияние электростатической силы на скорость вертикальных воздушных движений и на скорость седиментации частиц осадков.

Исследовался процесс электризации облака и формирования электрических полей, а также влияние электрических факторов на интенсивность опасных явлений погоды (ливень, град).

В результате расчетов получено, что основной вклад в электризацию облака вносит контактный механизм электризации частиц («тающая градина — облачная капля» и «дождевая капля — облачная капля»). Ионные механизмы играют важную роль на ранней стадии эволюции облака, однако не могут приводить к возникновению молниевых разрядов.

Электрические факторы способствуют некоторому ослаблению ливня и града по сравнению со случаем отсутствия учета электричества. Так, коэффициент экстремальности для максимального значения интенсивности дождя и града у подстилающей поверхности составил 0,87, для суммарной интенсивности осадков у земли — 0,89. Таким образом, для данного конкретного рассмотренного случая электростатическая сила способствует ослаблению таких опасных явлений, как ливень и град. Дополнительного исследования требует вопрос, что является причиной такого эффекта: особенности термодинамики атмосферы для данного конкретного случая или способ параметризации взаимосвязи осадкообразования и электризации в данной модели. Для получения более полной картины необходимо провести серию расчетов для большего количества случаев.

С целью более полного учета влияния электрических процессов на возникновение и развитие опасных явлений в перспективе необходимо учесть в модели ряд физических процессов:

- 1) испарение облачных кристаллов;
- 2) влияние электрического поля на седиментацию мелких облачных частиц;
- 3) влияние зарядов капель на их замерзание;
- 4) присутствие в облаке частиц твердых осадков двух фракций (град, крупа);
- 5) влияние коронных разрядов на микроструктуру облаков и ионообразование.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 15-05-05719\_a, 16-05-00197\_a, 17-05-00965\_a.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Морозов В. Н. (2006). О параметризации микрофизических процессов в численных моделях конвективных облаков // Метеорология и гидрология. № 11. С. 5—18.

*Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Морозов В. Н.* (2007). О параметризации микрофизических процессов электризации в трехфазной модели конвективного облака // *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 42—54.

*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.

*Гирс С. П., Довгалюк Ю. А.* (1975). О механизме заряжения облачных капель в теплых облаках. — Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 51 с.

*Горшков В. Г.* (1995). Физические и биологические основы устойчивости жизни. — М.: ВИНТИ. 470 с.

*Довгалюк Ю. А., Илев Л. С.* (1998). Физика водных и других атмосферных аэрозолей. — СПб: Изд-во СПбГУ. 322 с.

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

*Качурин Л. Г.* (1973). Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеоздат. 366 с.

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

*Кашлева Л. В., Михайловский Ю. П., Михайловский В. Ю.* (2016). Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. № 45. С. 118—131.

*Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Павар С. Д., Гопалакришнан В., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Богданов Е. В., Куров А. Б., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М.* (2017). Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков и изучение характеристик электрических разрядов с использованием данных о развитии Сб в районе Пятигорска // *Метеорология и гидрология*. № 6. С. 31—45.

*Морозов В. Н., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А.* (2009). Моделирование процессов электризации в трехмерной численной модели осадкообразующего конвективного облака (обзор) // *Труды ГГО*. Вып. 559. С. 134—160.

*Мучник В. М.* (1974). Физика грозы. — Л.: Гидрометеоздат. 352 с.

*Мучник В. М., Фишман Б. Е.* (1982). Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. — Л.: Гидрометеоздат. 207 с.

*Никандров В. Я.* (1981). Метеорологический аспект электризации конвективного облака. — Л.: Гидрометеоздат. 42 с.

Русанов А. И., Кузьмин В. Л., Гирс С. П., Довгалюк Ю. А. (1979). К исследованию механизма влияния заряда капли на скорость ее конденсационного роста // Труды ГГО. Вып. 405. С. 27—32.

Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д. (2005). Лабораторное моделирование коронного разряда в облаках. — СПб: Астерион. 62 с.

Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А. (2013). Коронный разряд в облаках // Радиофизика. Т. LVI. № 11—12. С. 1—12.

Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Богданов Е. В., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М. (2016). Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов // Метеорология и гидрология. № 9. С. 27—40.

Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Михайловский Ю. П., Богданов Е. В., Торопова М. Л., Игнатьев А. А., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М., Гопалакришнан В., Муругавел П., Павар С. Д. (2017). Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // Метеорология и гидрология. № 8. С. 18—28.

Шишкин Н. С. (1964). Облака, осадки и грозовое электричество. — Л.: Гидрометеиздат. 404 с.

Pruppacher H. R., Klett J. D. (1978). *Microphysics of Clouds and Precipitations*. — D. Reidel Publishing Company. 714 p.

Ziv A., Levin Z. (1974). Thunderstorm electrification cloud growth and electrical development // J. Atm. Sci. V. 31. P. 1652—1661.

УДК 551.576+551.594(470.2)

**САМОЛЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ЗАРЯДА САМОЛЕТА  
В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ  
НА РАННЕЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ**

*Р. Е. Торгунаков, Ю. П. Михайловский, А. А. Синькевич*

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

Поступила в редакцию 16.11.2017  
Поступила после доработки 13.12.2017

**Введение**

Исследования электрических характеристик облаков позволяют выявить природу процессов, ведущих к электризации грозовых облаков, выяснить роль электрических сил в образовании облаков и осадков, оценить возможности снижения электризации самолетов и увеличения безопасности полетов.

Одной из особенностей строения конвективных облаков является неоднородность их внутренней структуры. Как показывают исследования, практически для всех параметров облаков (температуры, влажности, скорости восходящих потоков, напряженности электрического поля) характерен пульсирующий ход (Синькевич, 1984, Драчева и др., 1988; Синькевич и др. 2005, Laroche, 1986).

В ГГО накоплен большой объем экспериментальных данных об облаках, полученных с использованием самолетов-лабораторий, оборудованных комплексами измерительных приборов (Драчева и др., 1988; Синькевич, 1994, 2001; Синькевич и др. 2005; Синькевич, 2001;

Михайловский, Кашлева, 2012; Михайловский, 2016).

Целью данной статьи является исследование вариаций напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках на ранней стадии их развития и их связей с другими микрофизическими и динамическими характеристиками облаков.

### **Используемые приборы и методы обработки данных**

Результаты, послужившие исходными данными для настоящей статьи, были получены специалистами ГГО 19 июля 1984 г. в ходе научно-исследовательского полета на специально оборудованном самолете Ил-14 (Звонарев и др., 1986).

Для измерения напряженности электрического поля использовался комплекс приборов — электростатических флюксометров с вращающейся заземленной пластиной, периодически перекрывающей измерительную пластину прибора. Диапазон измерений используемых флюксометров от 0 до 250 кВ/м, относительная погрешность измерений — не более 5 %.

Отдельной задачей при расчете величин напряженности поля является определение калибровочных коэффициентов, уникальных для каждого самолета, поскольку даже небольшие погрешности в определении коэффициентов приводят к существенным погрешностям в результатах измерений (Торгунаков и др., 2015). Для определения калибровочных коэффициентов впервые была использована методика компьютерного электростатического моделирования, основанная на использовании современной вычислительной техники (Торгунаков и др., 2017).

Измерения температуры выполнялись с помощью ИК-радиометра ИТ-3, принимающего излучение в области полосы поглощения водяного пара с центром 6,3 мкм (Синькевич, 1984). Радиометр устанавливался на самолете таким образом, чтобы осуществлять измерение с горизонтальной трассы, обеспечивая измерение с изотермической поверхности. Данные о температуре необходимы для анализа «перегрева» облака, представляющего собой разность

радиационной температуры в облаке относительно осредненной температуры безоблачного пространства. Погрешность измерений не превышала  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  за счет исключения ошибок измерения вследствие смачивания и обледенения обычных контактных датчиков температуры. Постоянная времени прибора равнялась  $0,5\text{ с}$ .

Водность фиксировалась с помощью прибора ДИВО (Синькевич и др., 2005). Принцип измерения водности с помощью ДИВО заключается в непрерывном определении электрической мощности, затрачиваемой непосредственно на испарение частиц водного аэрозоля, осаждающихся из воздушного потока на нагреваемый измерительный чувствительный элемент. Прибор обеспечивал измерение водности в диапазоне от  $0,1$  до  $3\text{ г/м}^3$  с погрешностью не более  $10\%$ .

Скорости восходящих и нисходящих потоков измерялись с помощью ультразвукового анемометра (БОРТ) (Синькевич и др., 2005). Ультразвуковой метод основан на использовании для целей измерения зависимости скорости распространения акустических колебаний в воздушной среде от скорости и направления ее движения относительно траектории распространения ультразвуковой волны. В приборе использовался четырехбазовый метод измерения. Рабочая частота составляла  $40,42\text{ кГц}$ . Анемометр обеспечивал измерения в диапазоне скоростей потоков от  $-20$  до  $+20\text{ м/с}$  с погрешностью не более  $0,5\text{ м/с}$ .

### **Описание эксперимента**

19 июля 1984 г. было выполнено исследование мощных кучевых облаков, развивавшихся на северо-западе России (Ленинградская область). Погода в районе работ определялась тыловым сектором циклона, центр которого располагался над Кольским полуостровом. Исследованные облака представляли собой гряду облаков *Cu cong*. Высота верхней границы составляла  $3,7\text{ км}$ , нижней —  $1,5\text{ км}$ . Облака находились в стадии стационарирования, не было отмечено значительных изменений в высоте верхней границы облаков, отсутствовали осадки. Облака на высоте пролета были капельными.

Эксперимент проходил с 18 ч 30 мин до 19 ч 55 мин. Все проходы (пролеты) были выполнены на высоте 3,0 км со скоростью около 220 км/ч.

Периодически наблюдалось обледенение. Несколько раз производилось воздействие на облака с помощью пиропатронов с составом ЛТИ-12. Визуально результатов воздействия отмечено не было.

В 19 ч 30 мин облака слились и начали рассеиваться, образуя облака Ас. В 19 ч 55 мин были зафиксированы просветы, через которые наблюдалась подстилающая поверхность.

На рис. 1 приведен пример распределения исследуемых характеристик при пересечении облака самолетом. Протяженность облака составила 4600 м. Верхняя граница облака была 3,5 км, нижняя — 2,1 км. Облако не формировало радиоэхо на экране бортового радиолокатора, что указывало на отсутствие крупных частиц.

Напряженность электрического поля в облаке была отрицательной, минимум находился в центре облака и был равен  $-197$  В/м. Имелись пространственные неоднородности, их протяженность находилась в пределах 400—600 м. При этом минимальное значение напряженности электрического поля не совпадало с областью наиболее сильных восходящих движений.

Минимальное значение заряда самолета равнялось  $-7,12 \cdot 10^{-6}$  Кл. Минимум заряда находится во второй половине облака, там же, где находятся максимумы других величин. Максимальные значения исследуемых параметров составили для водности  $2,5$  г/м<sup>3</sup>, для скорости вертикального потока  $12,8$  м/с, для перегрева  $+0,7$  °С.

Рассмотренные характеристики облака могут не коррелировать между собой, однако в отдельных областях облака отдельные характеристики одновременно достигали локальных максимумов.

### **Результаты исследования распределений значений напряженности электрического поля и заряда самолета**

При статистической обработке результатов эксперимента

определялись средние значения, медианы и среднеквадратические отклонения (СКО) измеряемых величин при доверительном интервале 95 %. Всего было проанализировано 763 измерений.

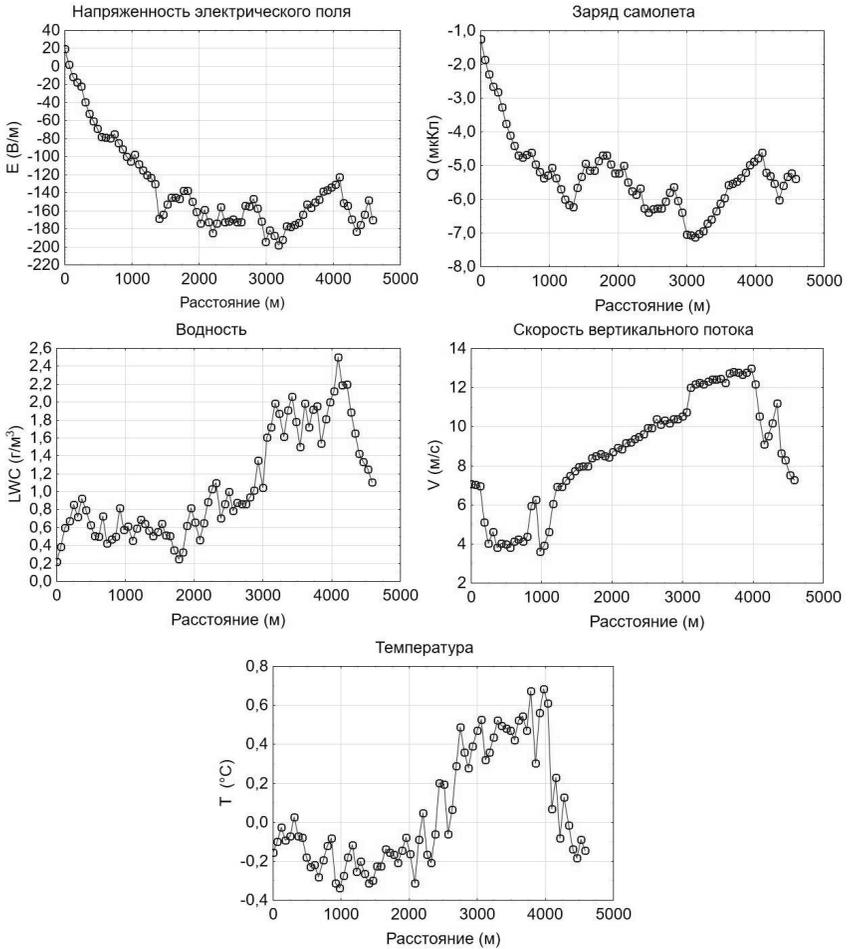


Рис. 1. Изменение напряженности электрического поля (E), заряда самолета (Q), водности (LWC), скорости вертикального потока (V), температуры (перегрева) (T) при проходе через облако № 4 (18:57—19:00).

Средние значения, медианы, максимумы, минимумы и среднеквадратические отклонения напряженности электрического поля и заряда самолета для каждого из исследованных облаков и общие по всем облакам приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Статистические характеристики напряженности электрического поля (E) в исследуемых облаках**

Объект исследования	E, В/м				
	Среднее	Медиана	Максимум	Минимум	СКО
Облако № 2	-124,4	-118,2	41	-319,4	64,1
Облако № 3	-121,3	-110,9	-1,9	-265,5	83,8
Облако № 4	-110,7	-132,4	19,8	-197,8	59,3
Облако № 5	-37,2	-37,9	18,3	-86,2	25,5
Облако после слияния	-40,8	-44,8	23,9	-81,5	22,1
Среднее	-91,7	-74,6	41	-319,4	68,5

Таблица 2

**Статистические характеристики заряда самолета (Q) в исследуемых облаках**

Объект исследования	Q, Кл·10 <sup>-6</sup>				
	Среднее	Медиана	Максимум	Минимум	СКО
Облако № 2	-5,0	-5,1	-0,1	-9,9	1,6
Облако № 3	-4,7	-3,9	-0,8	-9,4	2,5
Облако № 4	-4,8	-5,1	-1,3	-7,1	1,3
Облако № 5	-2,3	-1,9	-0,3	-4,3	1,2
Облако после слияния	-3,0	-3,1	-0,5	-4,7	0,9
Среднее	-4,1	-3,9	-0,1	-9,9	1,9

Минимальное значение напряженности поля в ходе всего эксперимента составило  $-319,4$  В/м, а максимальное значение  $+41$  В/м. Среднее значение равно  $-91,7$  В/м и от облака к облаку изменялось в пределах от  $-37,2$  до  $-124,4$  В/м.

Минимальное значение заряда самолета составило  $-9,9 \cdot 10^{-6}$  Кл, а максимальное  $-1 \cdot 10^{-7}$  Кл. Среднее значение равно  $-4,1 \cdot 10^{-6}$  Кл и от облака к облаку изменялось в пределах от  $-2,3 \cdot 10^{-6}$  до  $-5 \cdot 10^{-6}$  Кл.

Полученные значения напряженности поля, как по ранее опубликованным данным, так и данным настоящих исследований, соответствуют представлениям, согласно которым напряженность поля в облаке может быть как положительной, так и отрицательной. Однако следует отметить, что основное внимание исследователей сосредоточено на мощной кучевой и грозовой облачности, в то время как информация об электрической структуре конвективных облаков на ранней стадии развития в литературе весьма ограничена.

И. М. Имянитов (1970) показал, что поршневой двухдвигательный самолет в капельных облаках, подобных рассматриваемым в настоящей статье, в 20 % случаев приобретает отрицательный заряд не менее чем  $-6,7 \cdot 10^{-6}$  Кл. При этом среднее значение напряженности поля зависит от мощности облака и, как правило, не превышает 500 В/м, а сама напряженность с изменением высоты меняется и по величине, и по знаку.

По данным Ю. Ф. Пономарева и А. А. Синькевича для развивающихся облаков среднее значение напряженности поля составляет 240—260 В/м, а максимальные значения наблюдаются в центральной части облаков (Пономарев, Синькевич, 1997).

В работе Р. Харрис-Хоббса с соавторами приводятся данные, согласно которым в зависимости от концентрации капель в конвективных облаках на ранней стадии развития напряженность поля может изменяться от 50 до 10000 В/м (Harris-Hobbs et al., 1992).

Группой американских исследователей под эгидой НАСА проведено большое количество самолетных экспериментов по исследованию конвективных облаков в штате Флорида (Dye, Lewis, 2001). Согласно их данным средние значения напряженности поля в кучевых облаках колеблются от 50 до 50000 В/м. Наибольшую

повторяемость имеют значения в диапазоне 500—2000 В/м. При этом наблюдается явная тенденция к увеличению напряженности поля при увеличении концентрации капель (Dye et al., 2007).

В длительной серии самолетных исследований начальной стадии электризации конвективных облаков была установлена решающая роль ледяной фазы в начале процесса организованной электризации (Синькевич и др., 2005; Михайловский, Кашлева, 2012; Михайловский, 2016).

С учетом вышесказанного исследования начальной стадии электризации имеют принципиальное значение для понимания физики электризации облаков (Кашлева и др., 2016). Как следует из рис. 2 и 3, на которых представлены гистограммы распределения напряженности электрического поля и заряда самолета, наибольшая повторяемость значений напряженности электрического поля в исследованных облаках пришлась на диапазон от 0 до  $-50$  В/м, а подавляющее большинство значений напряженности находилось в диапазоне от 0 до  $-250$  В/м. Наибольшая повторяемость заряда наблюдалась в диапазоне от  $-2 \cdot 10^{-6}$  до  $-4 \cdot 10^{-6}$  Кл, а подавляющее большинство значений заряда находилось в диапазоне от  $-2 \cdot 10^{-6}$  до  $-6 \cdot 10^{-6}$  Кл. Распределения значений не симметричные, не соответствуют нормальному. При этом они являются унимодальными, без провалов и изолированных пиков, с ярко выраженным смещением максимума в сторону меньших значений, что может говорить как о недостаточной выборке, так и о специфическом характере распределения в конкретной облачной гряде.

При анализе других параметров, измеренных самолетом-лабораторией, установлено, что среднее значение влажности равнялось  $0,9$  г/м<sup>3</sup> и менялось от облака к облаку в диапазоне от  $0,7$  до  $1,1$  г/м<sup>3</sup>. Среднее значение скорости вертикальных потоков составило  $5,4$  м/с и менялось от  $3$  до  $8,7$  м/с. Среднее значение перегрева было равно  $0,5$  °С и изменялось от  $0,1$  до  $0,7$  °С.

На рис. 4 представлено относительное изменение во времени (от прохода к проходу) параметров облака № 2.

Во время второго прохода значения влажности, напряженности поля и заряда самолета достигли максимальных значений. Скорость

вертикальных потоков и перегрев со временем увеличились, в то время как напряженность электрического поля уменьшилась по абсолютному значению.

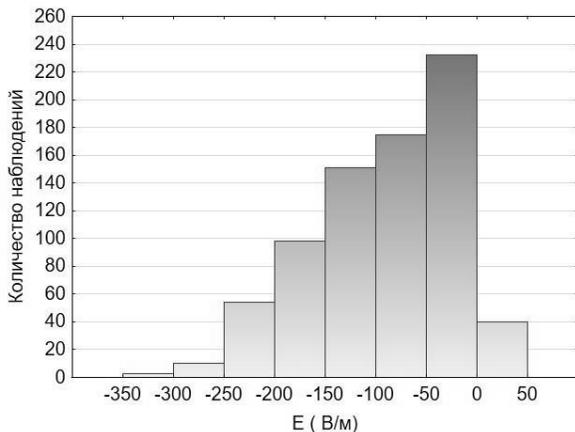


Рис. 2. Гистограмма распределения напряженности электрического поля.

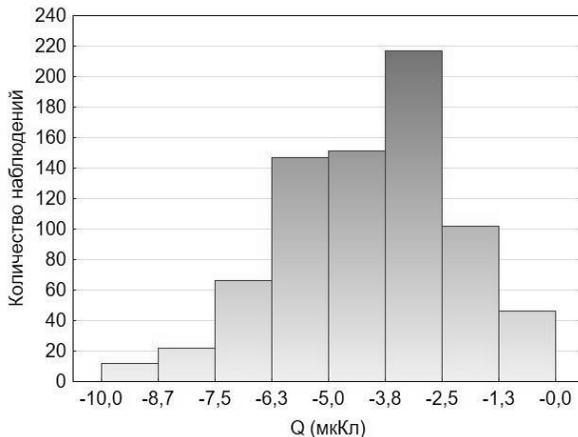


Рис. 3. Гистограмма распределения заряда самолета.

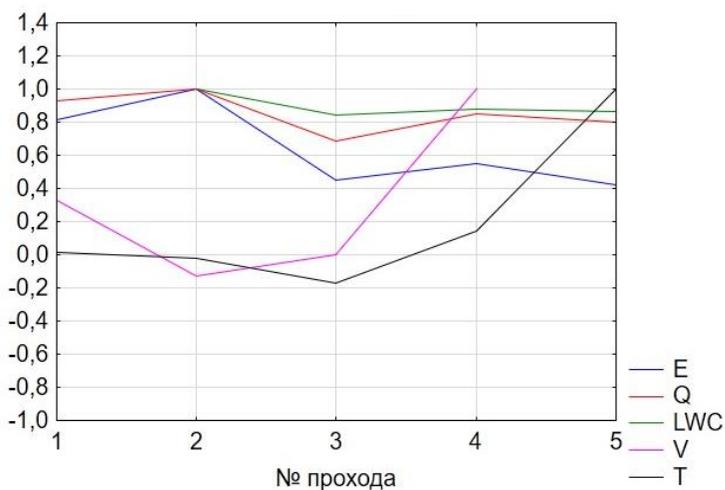


Рис. 4. Изменение относительных средних значений величин напряженности электрического поля (E), заряда самолета (Q), водности (LWC), скорости вертикального потока (V), температуры (перегрева) (T) от прохода к проходу.

На рис. 5 приводятся гистограммы, характеризующие изменение во времени напряженности поля, заряда и водности в облаке № 2. После проведения воздействия на данное облако в 18 ч 37 мин максимумы повторяемости всех трех величин сдвинулись в сторону меньших значений и далее оставались стабильными в течение эксперимента.

Диапазон разброса значений также уменьшился и составил в среднем 200 В/м для напряженности поля,  $4 \cdot 10^{-6}$  Кл для заряда,  $1 \text{ г/м}^3$  для водности. При этом, если в начале эксперимента значения параметров менялись, то во второй половине эксперимента они были относительно стабильны, напряженность поля была близка к 100 В/м, заряд к  $-5 \cdot 10^{-6}$  Кл, водность к  $1 \text{ г/м}^3$ . Часть из рассмотренных распределений близка к нормальному со смещенным максимумом.

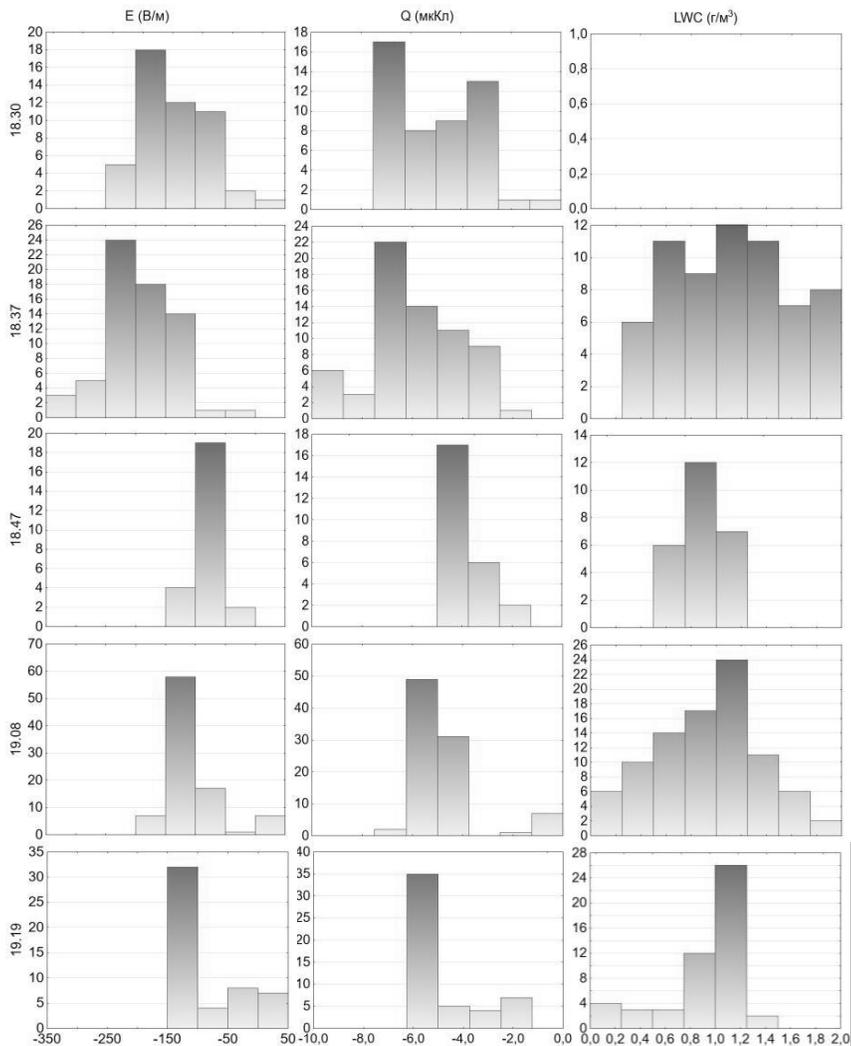


Рис. 5. Изменение распределений напряженности поля, заряда и водности во время исследования. Рядом с левой осью указано время начала соответствующего пролета в часах и минутах (18:30; 18:37 и т. д.).

Для определения статистической связи между измеряемыми характеристиками был произведен расчет корреляции по Пирсону. Не было обнаружено корреляции между напряженностью электрического поля или зарядом и скоростью восходящих потоков, напряженностью электрического поля или зарядом и перегревом.

Слабая отрицательная корреляция существует между напряженностью электрического поля, зарядом и водностью, что согласуется с данными, приведенными ранее — заряд самолета существенным образом зависит от водности и концентрации капель (Имянитов, Чубарина, 1965; Имянитов, 1970).

Диаграммы рассеяния между этими параметрами приведены на рис. 6 и 7. При увеличении водности имеется тенденция к увеличению по модулю напряженности поля и заряда самолета. Коэффициенты корреляции составили величину 0,49. Как видно, точки сильно разбросаны относительно друг друга. Тенденция не ярко выражена и может быть аппроксимирована простой линейной функцией.

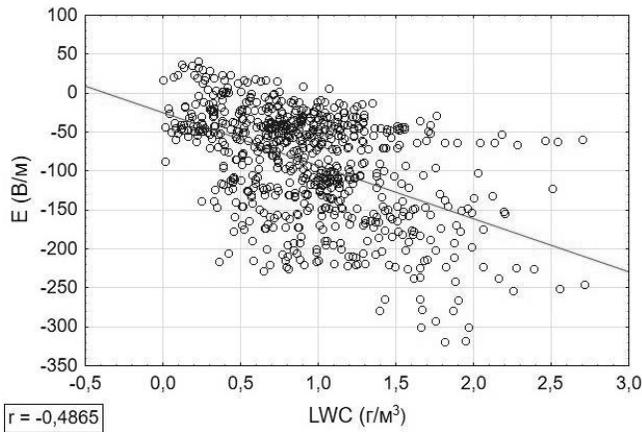


Рис. 6. Диаграмма рассеяния водности (LWC) и напряженности электрического поля (E).

$$E = -24,74 - 68,26 \cdot LWC.$$

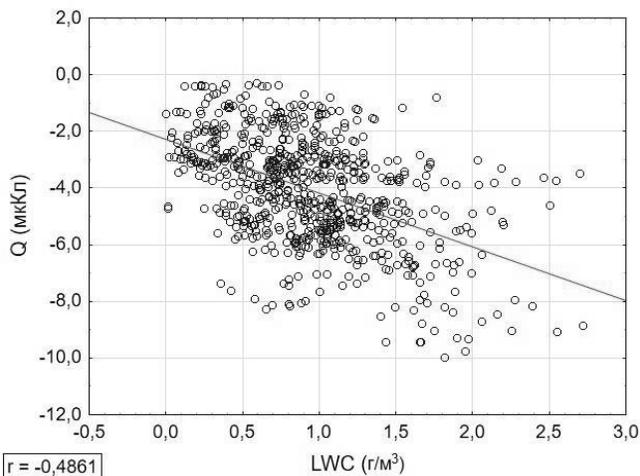


Рис. 7. Диаграмма рассеяния водности (LWC) и заряда самолета (Q).  
 $Q = -2,3 \cdot 10^{-6} - 1,89 \cdot 10^{-6} \cdot LWC$ .

### Выводы

Выполнен анализ результатов исследования напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках на ранней стадии их развития, полученных ранее с использованием самолета-лаборатории Ил-14. При этом для расчета данных о напряженности электрического поля и заряда самолета впервые использованы калибровочные коэффициенты, полученные на основе компьютерного моделирования.

В исследованных конвективных облаках напряженность электрического поля составила  $-92$  В/м при минимуме  $-320$  В/м, среднее значение заряда самолета было равно  $-4,1 \cdot 10^{-6}$  Кл при минимуме в  $-9,9 \cdot 10^{-6}$  Кл. При этом была установлена тенденция к увеличению абсолютных величин напряженности электрического поля и заряда самолета с увеличением водности в облаке.

Для исследованных облаков не обнаружено значимых корреляций между напряженностью электрического поля и зарядом самолета со скоростью восходящих потоков и перегревом облака.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 15-05-05719\_а, 16-05-00197\_а, 17-05-00965\_а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Драчева В. П., Синькевич А. А., Чубарина Е. В.* (1988). Исследование неоднородностей конвективных облаков // Труды ГГО. Вып. 518. С. 145—153.

*Звонарев В. В., Лядов В. С., Синькевич А. А., Пономарев Ю. Ф., Степаненко В. Д.* (1986). Особенности самолета-лаборатории ГГО Ил-14 // Труды ГГО. Вып. 497. С. 51—62.

*Имянитов И. М.* (1970). Электризация самолетов в облаках и осадках. — Л.: Гидрометеиздат. 210 с.

*Имянитов И. М., Чубарина Е. В.* (1965). Электричество свободной атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 240 с.

*Каишева Л. В., Михайловский Ю. П., Михайловский В. Ю.* (2016). Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. № 45. С. 118—131.

*Михайловский Ю. П., Каишева Л. В.* (2012). Методика и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью самолетов // В сб.: Радиолокационная метеорология и активные воздействия. — СПб: Гидрометеиздат. С. 98—114.

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

*Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А.* (1997). Электризация конвективных облаков на северо-западе России // Метеорология и гидрология. № 6. С. 73—80.

*Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Волков Н. Н., Довгалюк Ю. А., Пономарев Ю. Ф., Степаненко В. Д.* (2005). Экспериментальные исследования пространственно-временной неоднородности строения конвективных облаков // Метеорология и гидрология. № 6. С. 38—50.

*Синькевич А. А.* (1984). Исследование термических характеристик мощных кучевых облаков с помощью ИК-радиометра // *Метеорология и гидрология*. № 1. С. 40—46.

*Синькевич А. А.* (1994). Некоторые результаты исследований пульсаций температуры в слоистообразных облаках // *Труды ГГО*. Вып. 482. С. 97—107.

*Синькевич А. А.* (2001). Конвективные облака Северо-Запада России. — СПб: Гидрометеиздат. 106 с.

*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.* (2017). 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.

*Dye J. E., Lewis S.* (2001). Final Report to NASA KSC on the Airborne Field Mill Project (ABFM) — National Center for Atmospheric Research, Colorado.

*Dye J. E., Bateman M. G., Christian H. J., Defer E., Grainger C. A., Hall W. D., Krider E. P., Lewis S. A., Mach D. M., Merceret F. J., Willett J. C., Willis P. T.* (2007). Electric fields, cloud microphysics and reflectivity in anvils of Florida thunderstorms // *Journal of Geophysical Research*. V. 112. D11215.

*Harris-Hobbs R., Giori K., Bellmore M., Lunsford A.* (1992). Application of Airborne Field Mill Data for Use in Launch Support // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. V. 11. P. 738—750.

*Laroche P.* (1986). Airborne measurements of electrical atmospheric field produced by convective clouds // *Revue de Physique Appliquée*. V. 21. P. 809—815.

## **НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЛИЯНИЙ КОНВЕКТИВНЫХ ЯЧЕЕК НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

*В. А. Колбин, А. Д. Кузнецов, О. С. Сероухова, Т. Е. Симакина,  
А. С. Солонин*

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

Поступила в редакцию 1.12.2017  
Поступила после доработки 19.12.2017

### **Введение**

Известно, что с конвективной облачностью связаны наиболее опасные явления погоды. Немаловажное значение имеют они и для климата, поскольку влияют на радиационный режим системы земная поверхность — атмосфера вследствие переноса тепла, влаги, количества движения в верхние слои атмосферы. Зачастую эволюция конвективного облака исследуется изолированно от других облаков, однако большую роль в развитии процесса конвекции и осадкообразовании играет слияние облаков. В работе (Краус, и др., 2012а) отмечается увеличение массы облака и потока осадков в 2—3 раза в результате объединения облаков. По данным радиолокационных исследований на юге Флориды, слияние двух облаков средних размеров приводит к увеличению осадков в 10—20 раз, а также показано, что 86 % осадков формируется из облаков, которые сливались (Краус, и др., 2012б). Исследователи

также отмечали (Абшаев, 2008), что наиболее мощные и долгоживущие кучево-дождевые облака формируются путем слияния двух или нескольких конвективных ячеек.

Эффект влияния процессов слияния на характеристики облака и особенно на осадкообразующую способность можно считать доказанным. Однако количественные значения получены лишь для отдельных случаев, поэтому проведение статистических исследований такого рода процессов представляется актуальной задачей.

Целью работы является изучение процесса объединения конвективных ячеек и оценка временной динамики их характеристик над территорией Ленинградской области.

### **Исходная информация**

В качестве исходных данных использовалась радиолокационная информация, полученная с помощью автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса ДМРЛ «Метеоячейка», расположенного в аэропорту Пулково. Радиолокационные наблюдения за динамикой развития конвективных облаков проводились в течение 4-х месяцев летнего периода 2012 г., при этом был выявлен 21 случай слияния конвективных ячеек.

В процессе исследования слияния конвективных ячеек анализировалась структура горизонтальных разрезов зон радиоэха облаков в диапазоне высот: 0—1, 1—2, 2—3, 3—4 и 4—5 км, измерялись максимальная радиолокационная отражаемость ( $Z$ , dBz), высота верхней границы радиоэха ( $H_{вг}$ , км) и высота максимальной отражаемости ( $H_{max}$ , км).

### **Анализ процесса слияния конвективных ячеек**

Пример слияния конвективных ячеек, видимый на экране комплекса «Метеоячейка» представлен на рис. 1: рис. 1а — до слияния двух близко расположенных конвективных ячеек (первая конвективная ячейка по направлению движения обозначена цифрой «1», вторая — «2»), 1б — образование узкого облачного моста,

соединяющего конвективные ячейки; 1в — объединенное облако, образовавшееся в результате слияния двух конвективных ячеек.

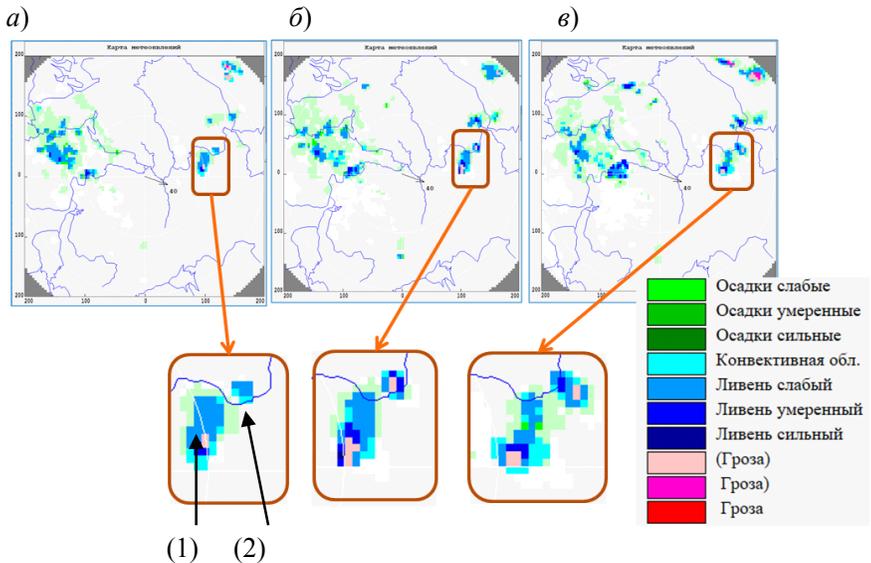


Рис. 1. Радиолокационный обзор метеоявлений за три срока с шагом 10 минут

а) до слияния; б) образование облачного моста; в) объединенное облако.

Результат статистического анализа случаев слияния конвективных ячеек в Ленинградской области представлен на рис. 2. Обнаружилось, что слияние облаков над водной поверхностью происходят чаще, чем над сушей (20 % случаев над Финским заливом, 35 % — над Ладожским озером, 45 % — над сушей). Слияний над территорией города зафиксировано не было.

В рассматриваемые летние месяцы слияние облаков происходило довольно равномерно, в течение суток — чаще утром до 10-ти, реже — днем, единичный случай — ночью.

Слияние облаков происходило как справа относительно среднего ветра, определяющего смещение главной облачной системы (40 % случаев), так и слева (60 % случаев). Аналогично распределились

случаи объединений облаков по виду синоптического процесса: 40 % — фронтальные условия слияний, 60 % — внутримассовые.

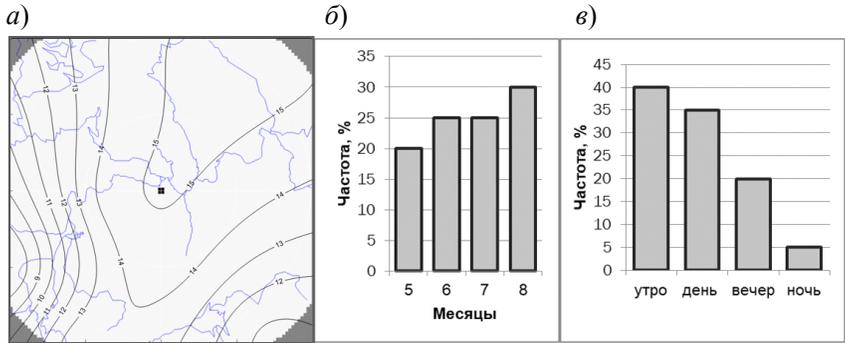


Рис. 2. Статистика слияний конвективных ячеек над территорией Ленинградской области:

- а) пространственное распределение повторяемости слияний, %;
- б) гистограмма слияний по месяцам;
- в) гистограмма слияний по времени суток.

### Механизм слияний конвективных облаков

Окончательной ясности в причинах и механизме процесса слияния облаков на сегодняшний день нет. Существуют три теории. Одна заключается в воздействии испарения облачных частиц на увлажнение межоблачного пространства, что приводит к формированию нового облака между сливающимися облаками (Довгалюк и др., 2017). Особенно благоприятные условия для этого создаются при сдвиге ветра, который способствует наклону облачной стены и образованию нависающих частей над соответствующим промежутком. Во второй теории причиной развития новой ячейки в межоблачном промежутке считается зона конвергенции на низких уровнях атмосферы (Cunning, De Maria, 1986). Третья теория объясняет слияние облаков разнонаправленностью их движения, вызванной вращением. В работе (Краус, и др., 2012а) упоминается о 58 % случаях слияния

именно вращающихся облаков.

Зачастую перед слиянием ячеек возникают облака нижнего яруса, которые соединяют между собой сливающиеся облака, такая перемычка получила название "облачного моста". Причиной появления "облачного моста" по мнению ряда ученых является взаимодействие холодных нисходящих потоков, формируемых сливающимися облаками (Довгалюк др., 2017). Появление радиоэха в этом месте обычно объясняется переносом облачных частиц соответствующими потоками в промежуток между сливающимися облаками.

Интенсификацию развития слившегося облака объясняют его укрупнением, вследствие чего вовлекающийся сухой воздух оказывает меньшее влияние, чем на отдельные небольшие облака (Kogan, Shapiro, 1996).

### **Динамика радиолокационных характеристик**

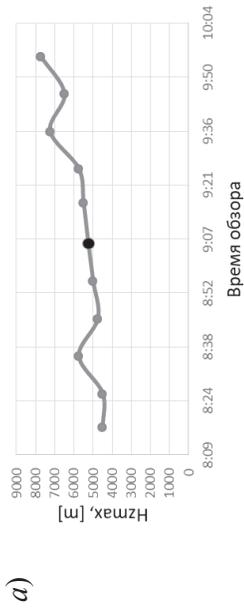
Динамику радиолокационных характеристик вследствие слияния конвективных ячеек иллюстрирует рис. 3, на временной оси которого обозначены пять сроков до слияния и пять после. Момент слияния отмечен черной точкой. Графики получены 13 июня 2012 г., данные соответствуют обзорам, предшествующим грозovým разрядам, обнаруженным в 13 ч.

Значения вертикальной проинтегрированной водности (VIL, кг/м<sup>2</sup>), обусловленные массой жидкой воды на единицу площади в столбе по всей вертикальной протяженности конвективного облака, вычислены по данным о фактическом изменении отражаемости (Lahiff, 2005):

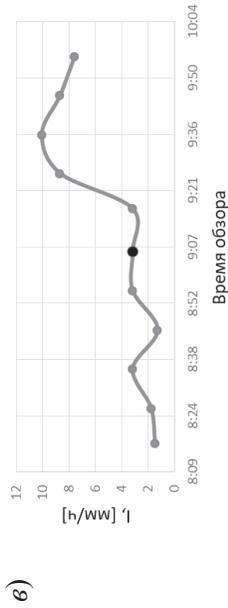
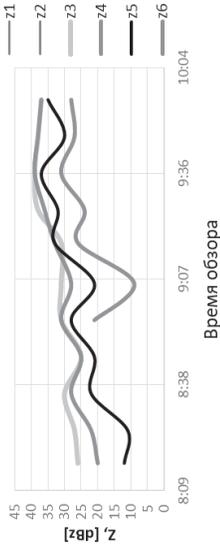
$$VIL = 3,44 \cdot 10^{-6} \cdot \sum \left[ \frac{(Z_i + Z_{i+1})}{2} \right]^{4/7} \cdot \Delta h$$

где  $Z_i$  — отражаемость в  $i$ -том слое;

$\Delta h$  — шаг по высоте.



б)



г)

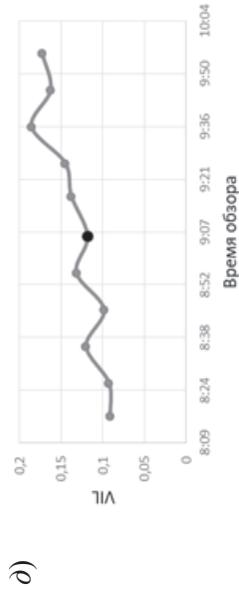
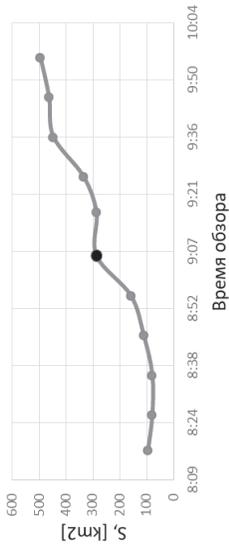


Рис. 3. Динамика радиолокационных характеристик:  
 а) высота максимальной отражаемости,  
 б) радиолокационная отражаемость на разных уровнях;

в) интенсивность осадков,  
 г) площадь осадков,  
 д) вертикальная водность.

На рис. 4 представлены вертикальные профили отражаемости: пунктирные линии — до слияния, черная жирная линия — в момент слияния, сплошные — после. Заметен рост отражаемости на первых трех уровнях после слияния.

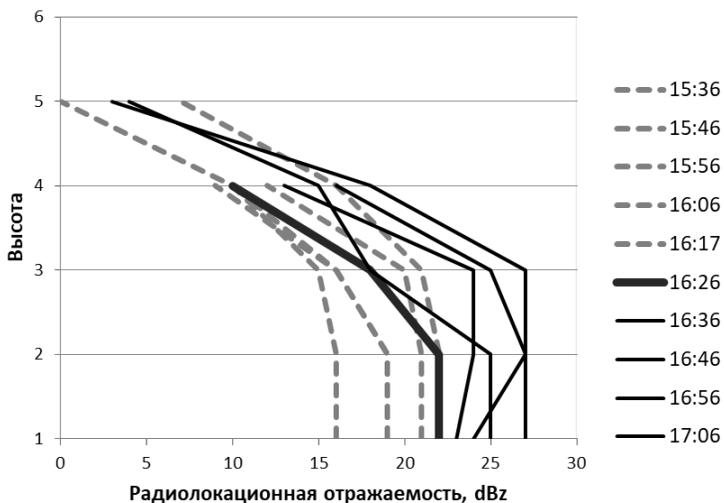


Рис. 4. Вертикальные профили радиолокационной отражаемости.

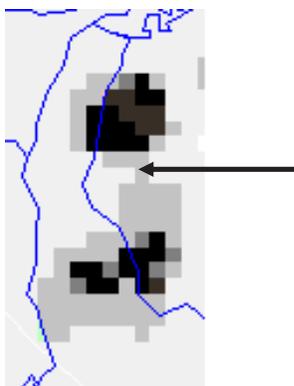


Рис. 5. «Облачный мост» перед слиянием (показан стрелкой).

Облака нижнего яруса ( $H < 3000$  м), составляющие «облачный мост», были зафиксированы в 45 % случаев, пример такого «моста» представлен на рис. 5.

### Заключение

В статье рассмотрено влияние слияния облаков на динамику их параметров над территорией Ленинградской области. В объединенном облаке, по сравнению с отдельно взятым, увеличиваются водность, высота максимального радиоэха, площадь осадков, радиолокационная отражаемость. Увеличение интенсивности осадков было меньше, чем в указанной ранее работе (Т. В. Краус, и др., 2012а). Площадь осадков при этом возрастала в среднем вдвое.

Обнаружено влияние подстилающей поверхности на процесс слияния. Так, объединение облаков, происходящее над сушей, приводило к небольшому усилению интенсивности осадков. Слияние над водной поверхностью Ладожского озера и Финского залива практически не меняло, либо даже уменьшало интенсивность осадков. При этом интегрированная водность и высота максимального радиоэха над водой были несколько выше аналогичных параметров над сушей. При слиянии над водной поверхностью этот факт объясняется нами формированием в облаке более интенсивного восходящего потока.

Установлено формирование «облачного моста» лишь в 45 % рассмотренных случаев. Площадь «моста» в среднем составила  $32 \text{ км}^2$ . «Мост» образовывался не ранее чем за 10 мин до слияния.

В целом можно констатировать, что процесс слияния оказывает влияние на эволюцию объединенного облака.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Абшаев М. Т.* (2008) Основные положения автоматизированной технологии противорадовой защиты и перспективы ее развития / В сб.: Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – М.: Изд-во ЛКИ. С. 14—26.

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

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

*Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Гопалакришнан В., Михайловский Ю. П., Муругавел П., Павар С. Д., Синькевич А. А., Торопова М. Л.* (2017). Численное моделирование слияния облаков с использованием трехмерной нестационарной модели облачной конвекции // *Труды ГГО*. № 584. С. 7—35.

*Cunning J. B., De Maria M.* (1986). An investigation of development of cumulonimbus systems over South Florida. Part I: Boundary layer interactions // *Mon. Wea. Rev.* V. 114. P. 5—24

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

*Lahiff, C. T.* (2005). Vertically integrated liquid density and its associated hail size range across the burlington, vermont county warning area — Eastern Region Technical Attachment. № 2005-01. 20 pp. National Weather Service, NOAA, Department of Commerce. Bohemia, NY.

## **ЗАРЯД КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ИСПАРЕНИИ И КОНДЕНСАЦИИ**

*А. В. Шавлов<sup>1,2</sup>, В. А. Джуманджи<sup>1</sup>, А. А. Яковенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН  
625000 Тюмень, а/я 1230

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет  
625000 Тюмень ул. Республики, 47  
E-mail: shavlov@ikz.ru

Поступила в редакцию 16.11.2017

Поступила после доработки 27.12.2017

### **Введение**

Интерес к изучению происхождения электрического заряда водяных частиц в облаках и атмосферных осадках вызван многими причинами. Во-первых, этот интерес связан с традиционным стремлением к углублению понимания природы атмосферного электричества (Williams et al., 2005; Shimogawa, Holzworth, 2009; Harrison et al., 2010; Кузнецов, 2004; Дворников, Балыбина, 2009). Во-вторых, он связан с разрешением загадки быстрого роста капель воды до дождевого размера в облаках (Elperin et al., 2013), где механизм электрокоагуляции может играть важную роль (Шавлов и др., 2016; Шавлов, Джуманджи, 2016). В-третьих, интерес связан со способностью заряженных частиц упорядочиваться в пространстве, влиять на вязкость воздушно-капельной среды и на процессы тепломассопереноса в атмосфере (Shavlov et al., 2014). К электрическим взаимодействиям водяных частиц также может иметь отношение известная проблема турбулентности ясного неба (Шавлов и др., 2016).

Популярной гипотезой заряжения водяных частиц в атмосфере является избирательная адсорбция ионов воздуха на поверхности

воды (Воейков, 1904; Френкель, 1949; Седунов, 1972). Причиной избирательной адсорбции ионов является наличие двойного электрического слоя на водной поверхности. Поле данного слоя направлено в сторону пара и затрудняет адсорбцию положительных ионов воздуха, облегчая адсорбцию отрицательных. Иначе объясняли процесс заряжения Донг и Халлетт (Dong, Hallett, 1992). Они связывали накопление отрицательного заряда водой с тем, что отрицательно заряженные ионы воздуха быстрее диффундируют к поверхности воды и внедряются в нее, чем положительно заряженные. При этом коэффициенты конденсации и тех, и других ионов на поверхности воды полагались одинаковыми. Опыты, выполненные в (Dong, Hallett, 1992), показали, что поверхность воды не всегда заряжается отрицательно относительно пара. Знак заряда зависит от того, какой процесс преобладает на поверхности воды: испарение или конденсация. При испарении знак заряда воды отрицательный, а при конденсации положительный. Лед в процессах испарения и конденсации может заряжаться противоположно воде.

В работе Шавлова (2009) была выдвинута гипотеза о том, что ионами, заряжающими водяные частицы, являются собственные носители заряда воды — протоны, гидроксид-ионы и ориентационные дефекты, а не ионы воздуха, возникающие под действием земной и космической радиации. Причинами разделения заряда считали накопление неравновесных носителей заряда на фазовом фронте и различие коэффициентов диффузии носителей заряда разного знака. Были рассчитаны межфазные электрическое поле и потенциал при различных скоростях испарения и конденсации. Знак разделенного заряда зависел от направления фазового превращения, а абсолютная величина — от скорости превращения. Работа имела недостатки:

а) не были учтены возможности разделения заряда в условиях фазового равновесия воды (льда) и пара;

б) не учитывалось различие коэффициента конденсации для воды и льда;

в) не рассчитывались нелинейные варианты задачи, как правило являющиеся наиболее реалистичными.

Целью настоящей статьи является свободный от недостатков работы Шавлова (2009) численный расчет электрического поля на поверхности воды (льда) при испарении и конденсации с участием собственных носителей, оценка эффективного электрического заряда капель воды сферической формы при различных скоростях фазового превращения.

## 1. Формулировка задачи

Рассмотрим плоский контакт воды или льда с паровоздушной смесью при нормальном атмосферном давлении и температурах существования воды или льда. В воде и льде носителями заряда являются протоны, гидроксид-ионы и ориентационные  $L$ - и  $D$ -дефекты. Равновесные концентрации протонов и гидроксид-ионов на много порядков меньше, чем равновесные концентрации ориентационных дефектов. На этом основании процесс переноса носителей заряда в воде или льде можно разделить на два:

- 1) процесс диффузии ориентационных  $L$ - и  $D$ -дефектов в самосогласованном электрическом поле;
- 2) процесс диффузии протонов и гидроксид-ионов в отсутствие самосогласованного электрического поля, уничтожаемого ориентационными дефектами, и в присутствии самосогласованного поля ориентационных дефектов в качестве внешнего.

Данный прием аналогичен раздельному рассмотрению диффузии основных и неосновных носителей заряда в полупроводниках (Бонч-Бруевич, Калашников, 1977).

Напомним, что ориентационные дефекты появляются и исчезают при поворотах молекул воды в конденсированной фазе. Они появляются парами, один  $L$ - и один  $D$ -дефект, и исчезают (рекомбинируют) тоже парами.  $L$ -дефект, несущий отрицательный заряд, соответствует такой ориентации двух ближайших молекул воды, при которой на линии, соединяющей атомы кислорода нет ни одного протона;  $D$ -дефект (заряд положительный) — два протона на линии; бездефектное состояние — один протон на линии. Протоны и

гидроксид-ионы также рождаются парами при диссоциации молекул воды и исчезают (рекомбинируют) тоже парами.

В паровоздушной смеси носителями заряда являются протоны и гидроксид-ионы. Ориентационные дефекты в данной среде не существуют, так как молекулы воды вращаются с высокой скоростью и не взаимодействуют друг с другом за исключением процессов соударения. Считаем, что воздух проницаем для пара достаточно хорошо, так что концентрация пара мало зависит от удаленности от фронта испарения или конденсации. Для этого скорость фазового превращения должна быть невысокой. В паровоздушной смеси протоны и гидроксид-ионы диффундируют в самосогласованном электрическом поле.

Порядок расчетов будет следующим. Сначала сформулируем и решим задачу диффузии ориентационных дефектов в воде и льде, вычислим самосогласованное поле, которое другими словами будем называть *полем двойного электрического слоя ориентационных дефектов*. Затем сформулируем и решим задачу межфазного разделения протонов и гидроксид-ионов в поле двойного электрического слоя, вычислим электрическое поле в паре вблизи поверхности воды или льда. Далее с помощью этого поля оценим величину эффективного электрического заряда капель воды сферической формы при различных радиусах капель и различных скоростях испарения или конденсации.

### 1.1 Задача для ориентационных дефектов

Пусть вода или лед занимают область полупространства  $x > 0$ . Основными носителями заряда в них являются ориентационные дефекты. Уравнения диффузии ориентационных дефектов в самосогласованном электрическом поле в стационарном случае и уравнение Пуассона имеют традиционный вид:

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} + \frac{d}{dx} [(-v + \mu_n E_0)(n + n_0)] - \frac{n + p + np / n_0}{\tau_0} = 0,$$

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} + \frac{d}{dx} [(-v - \mu_p E_0)(p + n_0)] - \frac{n + p + np/n_0}{\tau_0} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dE_0}{dx} = -\frac{e}{\varepsilon_0}(n - p),$$

где  $n$  и  $p$  — концентрации неравновесных отрицательно заряженных ориентационных  $L$ -дефектов и положительно заряженных ориентационных  $D$ -дефектов соответственно;

$n_0$  — концентрация равновесных  $L$ - или  $D$ -дефектов;

$D_n$ ,  $D_p$  и  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  — коэффициенты диффузии и подвижности данных дефектов соответственно;

$E_0$  — напряженность самосогласованного поля;

$\tau_0$  — время рекомбинации;

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость;

$\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;

$e$  — элементарный заряд;

$v$  — скорость движения среды относительно фронта испарения или конденсации или, другими словами, скорость испарения/конденсации (знак скорости положительный для конденсации и отрицательный для испарения, паровоздушная среда занимает область полупространства  $x < 0$ ).

Обсудим граничные условия для ориентационных дефектов сначала при испарении и конденсации воды, а затем при испарении и конденсации льда. Во-первых, отметим, что  $L$ - и  $D$ -дефекты присутствуют в конденсированной фазе в равных количествах, поэтому напряженность электрического поля дефектов на фронте испарения или конденсации равна нулю. Вдали от фронта она также стремится к нулю. Во-вторых, на границе вода—пар всегда происходит обмен молекулами  $H_2O$ . Поток молекул из пара в воду равен  $aV_T N_{vap}/2$ , где  $V_T$  — средняя скорость теплового движения молекул в направлении воды,  $N_{vap}$  — концентрация молекул  $H_2O$  в паре,  $a$  — коэффициент конденсации молекул; множитель  $1/2$  показывает, что только половина молекул движется в направлении

фазы воды, другая половина движется в обратном направлении. Коэффициент конденсации имеет значение, много меньшее единицы,  $a = 0,04$  (Амелин, 1966). Это обстоятельство указывает на то, что только малая часть молекул, ударяющихся о поверхность воды, прилипает к ней. Прилипание происходит только в том случае, когда молекула  $H_2O$  встраивается в поверхность без образования  $L$ - или  $D$ -дефекта, то есть наиболее энергетически выгодно. Обратный поток молекул из воды в пар формируют те молекулы  $H_2O$ , которые наиболее слабо связаны с водой, то есть это молекулы, входящие в состав ориентационных дефектов (таких молекул в воде много, примерно каждая третья). Таким образом, на поверхности воды существует поток исчезновения (убыли) ориентационных  $L$ - и  $D$ -дефектов, в сумме равный потоку молекул  $H_2O$  из пара в воду. В частности, поток  $L$ -дефектов равен половине этого потока  $j_n|_0 = -aV_T N_{vap}/4$ . Отсюда, учитывая общее выражение для потока

диффузии в движущейся среде  $j_n|_0 = -D_n \frac{dn}{dx}|_0 + v(n|_0 + n_0)$ ,

$$\text{получим } \frac{dn}{dx}|_0 = \frac{aV_T N_{vap} / 4 + v(n|_0 + n_0)}{D_n} \approx \frac{aN_{vap}V_T}{4D_n}.$$

Отметим, что слагаемое  $aV_T N_{vap}/4$  много больше слагаемого  $|v(n|_0 + n_0)|$  при разумных значениях скорости  $v$ , например  $|v| < 10^{-3}$  м/с. Для  $D$ -дефектов получим аналогичное выражение. Таким образом, поверхностный слой воды обеднен ориентационными дефектами. А из-за различия коэффициентов диффузии положительно и отрицательно заряженные дефекты оказываются разделенными в пространстве. В результате на поверхности воды существует двойной электрический слой ориентационных дефектов даже в условиях равновесия фаз воды и пара.

Граничные условия для ориентационных дефектов в воде имеют вид:

$$E|_0 = 0,$$

$$\left. \frac{dn}{dx} \right|_0 = \frac{aN_{vap}V_T}{4D_n}, \quad (2)$$

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_0 = \frac{aN_{vap}V_T}{4D_p}.$$

Теперь рассмотрим граничные условия для ориентационных дефектов в твердом агрегатном состоянии воды — во льде. Коэффициент конденсации для льда близок к единице,  $a = 1$  (Бутковский, 1994). Это означает, что все молекулы воды, ударяющиеся в паре о поверхность льда, встраиваются в решетку льда. Если представить молекулу в виде шара, одна половина которого заряжена положительно, а другая отрицательно, то молекула будет ударяться о поверхность льда либо положительно, либо отрицательно заряженной стороной. Если ориентация молекул в паре и молекул на поверхности льда случайны, то можно ожидать, что половина молекул встраивается в поверхность льда без образования ориентационных дефектов, а половина с образованием либо  $L$ -, либо  $D$ -дефекта. На самом деле молекула воды образует связи с четырьмя ближайшими соседями в конденсированной фазе, поэтому ей больше подходит тетраэдрическая модель, и для такой модели количество актов конденсации молекул без образования дефектов может отличаться от половины. Остановимся на модели молекулы в виде шара. Поток рождения  $L$ -дефектов на поверхности льда составляет  $j_{n|0} = aV_T N_{vap}/8$ . Такой же поток для  $D$ -дефектов. При обратном переходе молекул воды из льда в пар поток уничтожения ориентационных дефектов на поверхности льда мал, поскольку мала равновесная концентрация этих дефектов во льду (концентрация дефектов меньше концентрации молекул воды примерно в  $10^7$  раз). Следовательно, поверхностный слой льда обогащается ориентационными дефектами при обмене молекулами воды между льдом и паром. Из-за различия коэффициентов диффузии ориентационные дефекты формируют на поверхности льда двойной

электрический слой, противоположный по полярности двойному слою в воде. Граничные условия для ориентационных дефектов во льду имеют вид:

$$E|_0 = 0,$$

$$\left. \frac{dn}{dx} \right|_0 = -\frac{aN_{vap}V_T}{8D_n}, \quad (3)$$

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_0 = -\frac{aN_{vap}V_T}{8D_p}.$$

*Метод решения.* Нелинейную систему уравнений (1) решали численным методом Рунге—Кутты четвертого порядка, реализованным в функции **rkfixed** программы **Mathcad 15.0**. На поверхности конденсированной фазы задавали граничные условия (2) или (3) и подбирали значения концентраций  $n$  и  $p$  таким образом, чтобы вдали от поверхности напряженность электрического поля и концентрации неравновесных дефектов стремились к нулю.

## 1.2 Задача для протонов и гидроксид-ионов

Движение протонов и гидроксид-ионов в окружении многочисленных ориентационных дефектов в воде и льде можно описать с помощью уравнений диффузии. Напряженность самосогласованного поля  $E$  будем считать равной нулю, так как незначительное перемещение ориентационных дефектов мгновенно компенсирует это поле (Бонч-Бруевич, Калашников, 1977). На перемещение протонов и гидроксид-ионов влияет внешнее поле двойного слоя  $E_0$ . Система уравнений в воде и льде ( $x > 0$ ) имеет следующий вид:

$$D_{m_2} \frac{d^2 m}{dx^2} + \frac{d}{dx} [(-v + \mu_{m_2} E_0)(m + m_2)] - \frac{m + q + mq/m_2}{\tau_2} = 0,$$

$$D_{q_2} \frac{d^2 q}{dx^2} + \frac{d}{dx} [(-v - \mu_{q_2} E_0)(q + m_2)] - \frac{m + q + mq/m_2}{\tau_2} = 0, \quad (4)$$

где  $m, q$  — концентрации неравновесных гидроксид-ионов и протонов соответственно;

$m_2$  — равновесная концентрация протонов или гидроксид-ионов;

$D_{m_2}, D_{q_2}$  и  $\mu_{m_2}, \mu_{q_2}$  — коэффициенты диффузии и подвижности гидроксид-ионов и протонов соответственно;

$\tau_2$  — время рекомбинации;

$v$  — скорость испарения или конденсации ( $v < 0$  при испарении,  $v > 0$  при конденсации).

В паре протоны и гидроксид-ионы движутся в самосогласованном поле  $E$ . Поле двойного слоя  $E_0$  отсутствует. Система уравнений в паре ( $x < 0$ ) имеет следующий вид:

$$D_{m_1} \frac{d^2 m}{dx^2} + \frac{d}{dx} [(-v_1 + \mu_{m_1} E)(m + m_1)] - \frac{m + q + mq/m_1}{\tau_1} = 0,$$

$$D_{q_1} \frac{d^2 q}{dx^2} + \frac{d}{dx} [(-v_1 - \mu_{q_1} E)(q + m_1)] - \frac{m + q + mq/m_1}{\tau_1} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{e}{\varepsilon_1 \varepsilon_0} (m - q),$$

где  $\varepsilon_1$  — диэлектрическая проницаемость пара;  $v_1$  — скорость движения пара относительно фронта испарения или конденсации (знаки  $v_1$  и  $v$  совпадают).

Остальные обозначения аналогичны обозначениям в (4), индекс «1» указывает на принадлежность паровой фазе.

Составим граничные условия:

$$\begin{aligned}
 1) \quad m|_{-0} &= k_m m|_{+0}, \quad q|_{-0} = k_q q|_{+0}, \\
 2) \quad j_{m,q}|_{-0} &= j_{m,q}|_{+0}, \\
 3) \quad \varepsilon_1 E|_{-0} &= \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = -\frac{e}{\varepsilon_0} \int_0^{\infty} (m - q) dx.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Граничное условие 1) в (6) определяет концентрации неравновесных гидроксид-ионов и протонов в паре через таковые в конденсированной фазе с учетом их коэффициентов распределения  $k_m$  и  $k_q$ . Напомним, что коэффициент распределения равен отношению концентрации частиц в паре к концентрации в конденсированной фазе. Коэффициенты распределения  $k_m$  и  $k_q$  имеют значения около  $10^{-11}$  (смотри ниже), что на много порядков меньше коэффициента распределения молекул  $H_2O$ ,  $k_{H_2O} \approx 10^{-5}$ . Это означает, что при переходе гидроксид-ионов и протонов из конденсированной фазы в пар необходимо преодолеть потенциальный барьер больший, чем требуется молекуле воды при испарении. В результате оказывается, что при испарении лишь незначительная часть протонов и гидроксид-ионов может преодолеть барьер и перейти из конденсированной фазы в пар. Основная часть носителей, поступающих к фронту испарения вследствие перемещения среды, накапливается у фронта. Различие коэффициентов диффузии носителей приводит к разделению заряда в пространстве и к электрическому зарядению конденсированной фазы относительно пара. В обратном процессе — процессе конденсации водяного пара — носители заряда в конденсированной фазе, наоборот, истощаются, диффузия протекает в обратном направлении, и заряд конденсированной фазы оказывается противоположным тому, который возникает при испарении.

Граничное условие 2) в (6) показывает, что потоки гидроксид-ионов и протонов в паре равны потокам в конденсированной фазе, где, например, для гидроксид-ионов потоки имеют вид:

$$j_m|_{-0} = -D_{m1} \left. \frac{dm}{dx} \right|_{-0} + (v_1 - \mu_{m1} E|_{-0}) (m|_{-0} + m_1),$$

$$j_m|_{+0} = -D_{m2} \left. \frac{dm}{dx} \right|_{+0} + v(m|_{+0} + m_2).$$

Граничное условие 3) в (6) выражает напряженность электрического поля в паре через плотность поверхностного заряда  $\sigma$  конденсированной фазы. Отметим, что поверхностный заряд обеспечивают гидроксид-ионы и протоны. Ориентационные дефекты вклада не дают, так как их суммарный заряд равен нулю.

Для решения задачи (4)—(6) использовали численный метод Рунге—Кутты четвертого порядка. Применяли методику стрельбы. Для этого в конденсированной фазе вдали от фронта испарения (конденсации), где задача является заведомо линейной, подбирали значение концентрации  $m$  ( $q$  в данной точке рассчитывали по значению  $m$  на основе линейного уравнения) таким образом, чтобы после сшивки решений на границе  $x = 0$  решения для  $m$ ,  $q$ ,  $E$  в паре вдали от фронта стремились к нулю.

## 2. Результаты и их обсуждение

### 2.1 Двойной электрический слой ориентационных дефектов

*Параметры воды при температуре  $t = 20$  °C:*  $n_0 = 6 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$  (значение концентрации выбрано таким образом, чтобы величина произведения  $n_0\tau_0$  совпадала с таковой во льде, где  $(n_0\tau_0)^{-1}$  представляет собой константу скорости рекомбинации дефектов),  $D_n = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $D_p = 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$  (коэффициенты диффузии

выбраны такими же, как во льде, согласно данным (Эйзенберг, Кауцман, 1975). Отметим, что в работе Шавлова (2009) использовали намного меньшие значения коэффициентов диффузии, полагая, что заряженный слой воды имеет большую толщину, и электропроводимость осуществляется путем чередования движения ориентационных дефектов и протонов так, что вклад в электропроводимость и тех, и других одинаков. В результате диффузия ориентационных дефектов оказывалась стесненной. В настоящей работе уточнено, что реальная толщина двойного электрического слоя в воде равна толщине одного-двух мономолекулярных слоев, вследствие чего указанный в работе Шавлова (2009) механизм чередования носителей заряда при электропроводимости не реализуется. Далее,  $\varepsilon = 90$ ,  $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-11}$  с — время диэлектрической релаксации воды (Эйзенберг, Кауцман, 1975),  $a = 0,04$  (Амелин, 1966),  $N_{vap} = P_{vap} / kT = 6 \cdot 10^{23}$  м<sup>-3</sup> (Волков, Жарский, 2005),  $V_T = 300$  м/с.

*Параметры льда при  $t = -10$  °C:*  $n_0 = 6 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup>,  $D_n = 4 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с,  $D_p = 2 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с,  $\varepsilon = 100$ ,  $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  с — время диэлектрической релаксации льда (Эйзенберг, Кауцман, 1975),  $a = 1$  (Бутковский, 1994),  $N_{vap} = 1,5 \cdot 10^{23}$  м<sup>-3</sup>.

На рис. 1 изображены полные концентрации ориентационных  $D$ - и  $L$ -дефектов в воде и во льде при не слишком высокой скорости движения фронта испарения или конденсации, например  $|v| < 10^{-3}$  м/с.

Низкая скорость должна удовлетворять условию

$$|v| \ll \left( \sqrt{\frac{D_n}{\tau_0}}, \frac{D_n}{L} \right)_{\min} \approx 1 \text{ м/с, где } L = \left( \frac{\varepsilon_0 kT}{e^2 2n_0} \right)^{0.5} \text{ — длина Дебая.}$$

При низкой скорости фазового процесса распределение концентраций не зависит ни от знака, ни от величины скорости. Кривые 1 и 2 показывают, что поверхность воды обеднена ориентационными дефектами из-за обмена воды и пара молекулами H<sub>2</sub>O. В результате этого обеднения дефекты диффундируют из глубоких слоев воды к поверхности, заряжая поверхность воды отрицательно (так как отрицательно заряженные дефекты более

подвижны, чем положительно заряженные), а глубокие слои воды — положительно.

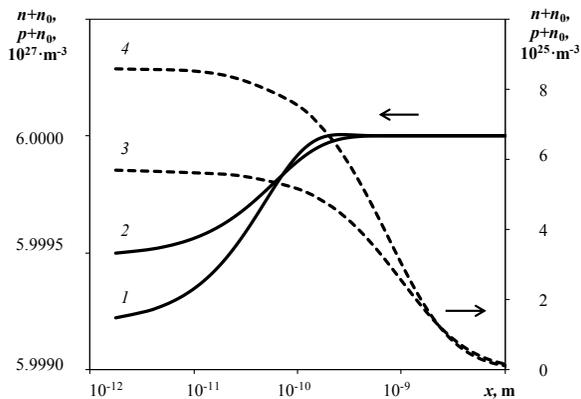


Рис. 1. Концентрации ориентационных  $D$ - и  $L$ -дефектов в воде (кривые 1 и 2 соответственно) и во льде (кривые 4 и 3 соответственно) при низкой скорости испарения или конденсации.

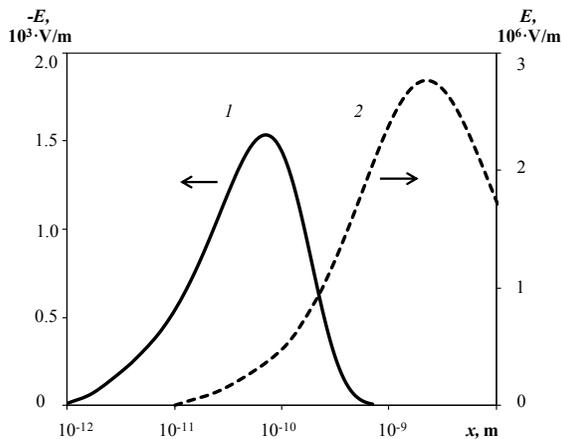


Рис. 2. Электрическое поле двойного слоя ориентационных дефектов в воде и льде (кривые 1 и 2 соответственно).

У поверхности воды образуется двойной электрический слой, в котором поле имеет отрицательное направление (см. рис. 2 кривая 1). Поверхность льда при обмене с паром молекулами  $H_2O$  обогащается ориентационными дефектами, как видно на кривых 4 и 3 (рис. 1). В результате обогащения дефекты диффундируют от поверхности вглубь льда. Поверхность льда заряжается положительно (по причине высокой подвижности отрицательно заряженных дефектов), а глубокие слои льда заряжаются отрицательно. Поле двойного слоя ориентационных дефектов во льде имеет положительный знак (см. рис. 2 кривая 2).

## 2.2 Межфазное разделение протонов и гидроксид-ионов

*Параметры воды при  $t = 20$  °C:*  $m_2 = 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $D_{m_2} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $D_{q_2} = 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\varepsilon = 90$ ,  $\tau_2 = (m_2\gamma)^{-1} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ , где  $\gamma = 2,3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$  — константа скорости рекомбинации протонов и гидроксид-ионов (Эйзенберг, Кауцман, 1975),  $k_{H_2O} = N_{vap} / N_{H_2O} = 2 \cdot 10^{-5}$ , где  $N_{H_2O} = 3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  — концентрация молекул в воде,  $k_m = k_q = 10^{-11}$ . Значение коэффициентов  $k_m$  и  $k_q$  было рассчитано на основании опытных данных по электропроводности воды,  $\sim 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  (Эйзенберг, Кауцман, 1975), и электропроводности воздуха у поверхности земли,  $10^{-14}$ — $10^{-13} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  (Имянитов, Чубарина, 1965). Внутри облаков электропроводность может быть в десятки раз выше из-за обмена водяных капель и воздуха протонами и гидроксид-ионами. Поэтому значения коэффициентов  $k_m$  и  $k_q$  можно выбирать в десятки раз более высокими. Но в нашей задаче это не имеет существенного значения, так как коэффициенты  $k_m, k_q$ , будучи малыми ( $\ll 1$ ), слабо влияют на искомый результат. Напомним, что мы ищем величину напряженности электрического поля на поверхности воды и льда при испарении (конденсации).

*Параметры льда при  $t = -10$  °C:*  $m_2 = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ,  $D_{m_2} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $D_{q_2} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\varepsilon = 100$ ,  $\tau_2 = (m_2\gamma)^{-1} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , где  $\gamma = 1,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$  — константа скорости рекомбинации протонов и гидроксид-ионов (Эйзенберг, Кауцман, 1975),  $k_{H_2O} = N_{vap} / N_{H_2O} =$

$5 \cdot 10^{-6}$ ,  $k_m = k_q = 10^{-7}$  (электропроводность льда  $\sim 10^{-8}$  Ом $^{-1}$ м $^{-1}$  (Эйзенберг, Кауцман, 1975)).

Параметры водяного пара:  $m_1 = m_2 \cdot k_m$ ,  $D_{m1} = 10^{-5}$  м $^2$ /с,  $D_{q1} = 2 \cdot 10^{-5}$  м $^2$ /с (считаем, что протон в паровой фазе ассоциирован с молекулой воды и имеет такой же коэффициент диффузии, как молекула H $_2$ O,  $2 \cdot 10^{-5}$  м $^2$ /с (Кошкин, Ширкевич, 1976); гидроксид-ион тоже ассоциирован с молекулой воды и имеет вдвое меньший коэффициент диффузии, как более тяжелый). Далее  $\tau_1 = \tau_2 / k_m$ ,  $\varepsilon_1 = 1$ ,  $v_1 = v / k_{H_2O}$ .

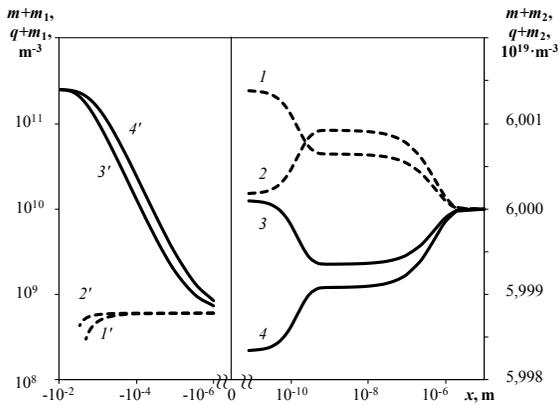


Рис. 3. Распределение концентраций протонов и гидроксид-ионов в воде ( $x > 0$ ) и паре ( $x < 0$ ).

Протоны и гидроксид-ионы, кривые 1, 1' и 2, 2' соответственно, при испарении.  
 Протоны и гидроксид-ионы, кривые 3, 3' и 4, 4' соответственно, при конденсации.  
 $|v| = 2 \cdot 10^{-7}$  м/с.

На рис. 3 представлены зависимости полных концентраций протонов и гидроксид-ионов от координаты в воде и паре при скорости испарения или конденсации  $|v| = 2 \cdot 10^{-7}$  м/с. При значениях скорости  $|v| = 2 \cdot 10^{-7}$  м/с на графиках концентраций в конденсированной фазе одновременно хорошо видны возмущения концентраций в интервале координат  $0—10^{-6}$  м, обусловленные разделением заряда на фазовом фронте, а также возмущения

концентраций в интервале координат  $0—10^{-9}$  м, вызванные двойным электрическим слоем. Именно для наилучшей иллюстрации была выбрана данная скорость.

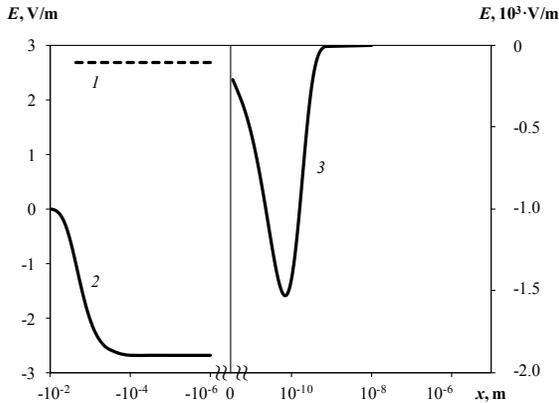


Рис. 4. Распределение электрического поля в паре при испарении (кривая 1) и в паре при конденсации (кривая 2), и поля двойного слоя в воде при испарении или конденсации (кривая 3).  $|v| = 2 \cdot 10^{-7}$  м/с.

При испарении воды протоны и гидроксид-ионы накапливаются в воде, вблизи ее поверхности, как видно на кривых 1 и 2 (рис. 3). Накопление происходит потому, что носители заряда поступают к поверхности воды со скоростью движения среды —  $v$ , а в пар переходит только очень малая часть носителей из-за наличия потенциального барьера. Но чем больше накопится носителей на поверхности воды, тем большее их количество преодолет барьер и поступит в пар. Чаще в пар попадают наиболее подвижные носители в воде, то есть протоны. Именно поэтому при испарении воды пар заряжается положительно, а вода отрицательно. Поле на поверхности воды имеет положительный знак. В паре поведение протонов и гидроксид-ионов определяется знаком поля на поверхности воды. При положительном знаке поля амбиполярная плазма протонов и гидроксид-ионов смещается против поля (в ту же сторону, в которую

смещаются наименее подвижные носители — гидроксид-ионы), и концентрации протонов и гидроксид-ионов в паре истощаются, как видно на кривых  $1'$  и  $2'$  (рис. 3). В результате этого электрическое поле от поверхности воды слабо экранируется носителями и проникает глубоко в пар (см. кривая  $1$  рис. 4).

При конденсации пара концентрации протонов и гидроксид-ионов в воде истощаются, как следует из кривых  $3$  и  $4$  (рис. 3). Истощение происходит вследствие того, что носителей заряда из пара в воду поступает крайне мало из-за низкой концентрации носителей в паре  $m_1$ . А в воде носители заряда уносятся от поверхности со скоростью движения среды  $v$  с большой равновесной концентрацией  $m_2$ . Благодаря высокому значению коэффициента диффузии протоны в большем количестве переходят из пара в воду, заряжая воду положительно, а пар отрицательно в процессе конденсации. Знак электрического поля на поверхности воды отрицательный. В паре амбиполярная плазма протонов и гидроксид-ионов перемещается против поля в направлении границы с водой. Количество носителей заряда у межфазной границы накапливается, как видно на кривых  $3'$  и  $4'$  (рис. 3). Благодаря высокой концентрации носителей в паре электрическое поле заряженной поверхности воды быстро экранируется и стремится к нулю, как видно на кривой  $2$  (рис. 4).

На рис. 5 представлены зависимости напряженности электрического поля на поверхности воды и льда от линейной скорости испарения (конденсации). При низких скоростях испарения (конденсации) поле не зависит ни от величины скорости фазового превращения, ни от направления фазового перехода. Величина поля определяется зарядом конденсированной фазы, приобретенным за счет переноса протонов и гидроксид-ионов в поле двойного слоя. Вода при этом имеет положительный заряд ( $E < 0$ ), а лед отрицательный заряд ( $E > 0$ ). При высоких скоростях испарения (конденсации) начинает преобладать механизм межфазного разделения заряда, не связанный с воздействием поля двойного слоя. В этом случае электрическое поле  $E$  на поверхности конденсированной фазы изменяется пропорционально скорости фазового превращения  $v$ , взятой с отрицательным знаком ( $E \propto -v$ ).

Знак напряженности поля отрицательный при конденсации и положительный при испарении. Абсолютная величина напряженности электрического поля на поверхности воды может достигать относительно большого значения  $10^5$  V/m при линейной скорости фазового превращения  $10^{-3}$  m/s. Напомним, что при напряженности поля  $3 \cdot 10^6$  V/m в воздухе наступает электрический пробой.

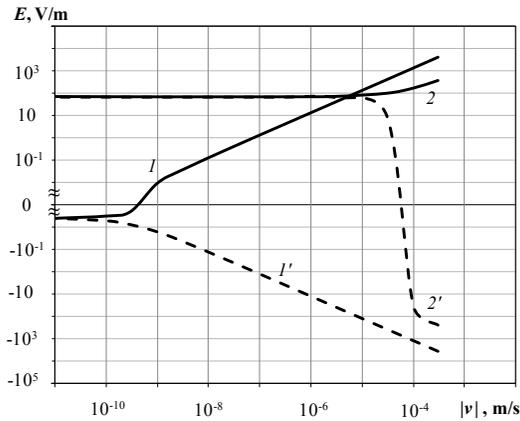


Рис. 5. Зависимость напряженности электрического поля на поверхности конденсированной фазы от линейной скорости фазового превращения.  
 Кривые 1 и 2 — при конденсации воды и льда соответственно;  
 1' и 2' — при испарении соответственно.

### 3. Заряд водяных капель сферической формы

Оценим электрический заряд капель воды сферической формы по найденной величине напряженности электрического поля на поверхности воды, используя классическую формулу:

$$E = \frac{eZ}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0R^2}, \tag{7}$$

где  $Z$  — заряд капли в единицах элементарного заряда;  $R$  — радиус капли;  $E$  — напряженность поля на поверхности капли.

При этом необходимо сделать некоторые замечания. В работе (Shavlov et al., 2013) было показано, что для заряженной капли, помещенной в плазму, формулой (7) можно пользоваться в том случае, когда заряд капли так мал, что потенциальная энергия взаимодействия носителя заряда плазмы с каплей  $e\phi$  во много раз меньше кинетической энергии носителя  $kT$ ,  $|e\phi| \ll kT$ , где  $\phi$  — потенциал электрического поля капли.

При большом заряде капли, когда  $|e\phi| \gg kT$ , вокруг капли формируется прочная плазменная оболочка, имеющая некоторую толщину и заряд, частично компенсирующий заряд капли. На внешние электрические воздействия капля откликается как единое целое с плазменной оболочкой. Таким образом, капля с оболочкой представляет собой частицу с эффективным зарядом  $Z^*$ ,  $Z^* < Z$ , и эффективным радиусом  $R^*$ ,  $R^* > R$ . Эффективный радиус  $R^*$  определяется из условия  $|e\phi^*| = kT$ , где  $\phi^*$  — значение потенциала на поверхности радиуса  $R^*$ . Далее в (7) под зарядом и радиусом капли будем подразумевать их эффективные значения  $Z^*$  и  $R^*$ , а под напряженностью поля — напряженность на сферической поверхности радиуса  $R^*$ .

На рис. 6 представлены зависимости эффективного заряда  $Z^*$  капли от напряженности электрического поля  $E$  на ее истинной поверхности при различных истинных значениях радиуса  $R$  капли. Заряд может достигать значительной величины,  $10^5$  элементарных зарядов, при радиусе  $10^{-3}$  м. При низкой напряженности поля эффективный заряд капли совпадает с истинным зарядом и возрастает прямо пропорционально величине напряженности. При большой напряженности поля, когда вокруг капли образуется плазменная оболочка, эффективный заряд насыщается. С увеличением радиуса капли эффективный заряд также возрастает. Значение радиуса Дебая плазмы оказывает слабое влияние на величину эффективного заряда капли.

Для расчета эффективного заряда капли использовали численные решения уравнения Пуассона—Больцмана в сферических координатах

$$\Delta\phi = \frac{em_1}{\varepsilon_1\varepsilon_0} \left( \exp\left(\frac{e\phi}{kT}\right) - \exp\left(\frac{-e\phi}{kT}\right) \right) \quad (8)$$

с граничными условиями

$$\left. \frac{\partial\phi}{\partial r} \right|_R = E, \quad \left. \frac{\partial\phi}{\partial r} \right|_\infty = 0, \quad (9)$$

где  $E$  — ранее найденное значение напряженности поля на поверхности воды.

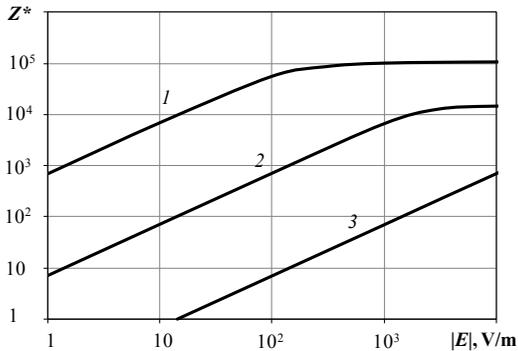


Рис. 6. Эффективный заряд  $Z^*$  капли воды в зависимости от напряженности электрического поля  $E$  на ее поверхности.

1 — радиус капли  $R = 10^{-3}$  м, 2 —  $10^{-4}$ , 3 —  $10^{-5}$ .

Радиус Дебая плазмы  $10^{-3}$  м.

### Заключение

Настоящая работа явилась существенным развитием работы Шавлова (2009). В ней сформулирована и решена нелинейная задача разделения электрического заряда на фронте испарения (конденсации)

воды и льда. Детально изучен механизм переноса протонов и гидроксид-ионов через межфазную границу. Особенностью поведения данных носителей является их накопление на фазовом фронте при испарении воды и льда и истощение концентрации носителей при конденсации пара. Изучено образование двойного электрического слоя ориентационных дефектов в конденсированной фазе при ее обмене с паром молекулами воды, и оценено влияние двойного слоя на межфазный перенос протонов и гидроксид-ионов. Вычислено электрическое поле на поверхности воды и льда, и оценен эффективный электрический заряд капли воды сферической формы с учетом образования плазменной оболочки вокруг капли. Заряд капли воды радиусом 10 мкм может достигать  $10^3$  элементарных зарядов, а при радиусе 1 мм —  $10^5$ . Такие значения согласуются с опытными данными (Бабичев и др., 1991). Таким образом, в работе показано, что для объяснения существования электрического заряда капель облаков и капель атмосферных осадков нет необходимости привлекать участие сторонних ионов воздуха. Достаточно участия собственных ионов воды, протонов и гидроксид-ионов, возникающих при диссоциации молекул воды. Эти собственные ионы заряжают капли в процессах испарения и конденсации.

Для дальнейшего развития и уточнения модели разделения зарядов, рассмотренной в настоящей работе, необходимо накопление подробных экспериментальных данных об электрических свойствах капель воды и частиц льда при различных скоростях процессов испарения и конденсации. Таких данных в литературе содержится крайне мало.

*Авторы выражают искреннюю благодарность В. П. Мельникову и С. Н. Романюк за многочисленные полезные рекомендации при обсуждении работы на разных ее этапах.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Амелин А. Г. (1966). Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. — М.: Химия. 304 с.

*Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др.* (1991). Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова — М.: Энергоатомиздат. 1232 с.

*Бонч-Бруевич В. Л., Калашиников С. Г.* (1977). Физика полупроводников. — М.: Мир. 678 с.

*Бутковский А. В.* (1994). О возможности экспериментального определения коэффициента конденсации льда при лазерной сублимации вблизи точки плавления // ТВТ. Т. 32. В. 5. С. 793—796.

*Воейков А. И.* (1904). Метеорология: в 4-х ч. — СПб: Картографическое заведение А. Ильина. 224 с.

*Волков А. И., Жарский И. М.* (2005). Большой химический справочник. — Минск: Современная школа. 608 с.

*Дворников В. М., Бальбина А. С.* (2009). О возможной природе атмосферного электричества Земли // Солнечно-земная физика. № 13. С. 75—77.

*Имянитов И. М., Чубарина Е. В.* (1965). Электричество свободной атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 240 с.

*Кошкин Н. Н., Ширкевич М. Г.* (1976). Справочник по элементарной физике. — М.: Наука. 256 с.

*Кузнецов В. В.* (2004). Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели. Сборник докладов. — Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. С. 165—196.

*Седунов Ю. С.* (1972). Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат. 207 с.

*Френкель Я. И.* (1949). Теория явлений атмосферного электричества. — М.: Гостехиздат. 155 с.

*Шаплов А. В.* (2009). Электрические процессы при испарении и конденсации воды и льда // Коллоидный журнал. Т. 71. № 2. С. 267—274.

*Шаплов А. В., Соколов И. В., Джуманджи В. А.* (2016). Вязкость и электрические свойства водных аэрозолей // Доклады АН. Т. 470 (1). С. 32—37.

*Шаплов А. В., Джуманджи В. А.* (2016). Взаимное притяжение и коалесценция капель воды в облаках и тумане // Труды ГГО. Вып. 581. С. 200—220.

*Эйзенберг Д., Кауцман В.* (1975). Структура и свойства воды. — Л.: Гидрометеиздат. 280 с.

*Dong Y., Hallett J.* (1992). Charge separation by ice and water drops during growth and evaporation // J. Geophys. Res. V. 97. P. 20361—20371.

*Elperin T., Kleeorin N., Liberman M., Rogachevskii I.* (2013). Tangling clustering instability for small particles in temperature stratified turbulence // *Phys. Fluids*. V. 25. P. 085104.

*Harrison R. G., Aplin K. L., Rycroft M. J.* (2010). Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. V. 72 (5). P. 376—381.

*Shavlov A. V., Romanyuk S. N., Dzhumandzhi V. A.* (2013). Effective charge and effective radius of water droplet in dropwise cluster // *Physics of Plasmas*. V. 20. № 2. P. 023703.

*Shavlov A. V., Sokolov I. V., Hazan V. L., Romanyuk S. N.* (2014). Viscosity of water fog // *Physica Scripta*. V. 89. P. 125402.

*Shimogawa M., Holzworth R. H.* (2009). Electric field measurements in a NLC/PMSE region during the MASS/ECOMA campaign // *Ann. Geophys.* V. 27. P. 1423—1430.

*Williams E., Markson R., Heckman S.* (2005). Shielding effects of trees on the measurement of the Earth's electric field: Implications for secular variations of the global electrical circuit // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L19810.

## **РАДИАЦИОННЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИНДЕКСЫ (МЕТРИКИ) СОВРЕМЕННЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА**

*И. Л. Кароль, А. А. Киселев*

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

Поступила в редакцию 11.12.2017

### **Введение**

Современные изменения климата составляют одну из наиболее важных стоящих перед человечеством проблем. Согласно (IPCC, 2013), ответственность за большую часть наблюдавшегося с 1951 г. роста температуры приземного воздуха, по крайней мере, с 95-процентной определенностью лежит на самом человеке. Главной причиной глобального потепления является обусловленный антропогенной хозяйственной деятельностью рост содержания в атмосфере парниковых газов: двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ , метана  $\text{CH}_4$ , закиси азота  $\text{N}_2\text{O}$  и др. Большинство из них имеют большое время жизни в атмосфере (например, упомянутые здесь  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  — около ста лет,  $\text{CH}_4$  — порядка десятилетия). Как известно, уменьшение эмиссии в атмосферу парниковых газов считается сегодня основным способом борьбы с глобальным потеплением. В качестве дополнительных мер предлагается сокращение выбросов короткоживущих климатических загрязнителей, в первую очередь, аэрозолей «черного углерода» (см., например, Molina et al., 2009; Кароль и др., 2013). В недавней статье Д. Шинделла и др. говорится: «Мы полагаем, что уменьшения короткоживущих климатических загрязнителей достаточно, чтобы замедлить предполагаемое

глобальное потепление на 0,5 °C в последующие 25 лет» (Shindell et al., 2017).

Одновременно происходящие изменения климата сказываются и на естественных процессах, происходящих в климатической системе нашей планеты, в частности, на особенностях сезонного хода ряда метеорологических и климатических характеристик. Основным индексом, служащим мерилем, сколь существенно воздействие того или иного природного или антропогенного фактора на климат, является широко используемый в исследованиях радиационный форсинг. Однако известно, что эта характеристика не всегда адекватно отражает вклад таких факторов в случаях, когда время их действия невелико, порядка нескольких дней или месяцев (Кароль и др., 2013).

Ниже, наряду с радиационным форсингом, оценивающим величину воздействия на климатическую систему, рассматривается еще один индекс — отклик климатической системы на такое воздействие. В качестве примеров приведены оценки обоих индексов для двух природных явлений: сезонного хода содержания в атмосфере углекислого газа и сезонного таяния морского льда в высоких северных широтах.

### 1. Отклик климатической системы на внешнее воздействие

Широко используемый в климатических исследованиях Радиационный Форсинг (RF) характеризует размер сигнала, «поданного» на климатическую систему. Ниже для оценки реакции климатической системы на этот сигнал рассматривается отклик на форсированный режим  $FRR$  (от английского Forced Regime Response). Эта метрика по смыслу близка к термину Глобальный Температурный Потенциал (GTP, (Shine et al., 2005)). Определим  $FRR$  как

$$FRR_A^X(t) = \Delta T^X(t) / \Delta T^A(t), \quad (1)$$

где  $\Delta T^X(H)$  и  $\Delta T^A(H)$  — изменения приземной температуры воздуха, обусловленные факторами  $X$  и  $A$  соответственно, в течение периода

$0 < t < H$ . Здесь фактор  $A$  служит «эталоном»: относительно него оцениваются все остальные факторы.

Таким образом, для практического использования соотношения (1) необходимо знать, как изменится приземная температура при воздействии тех или иных внешних факторов. Отношение величин  $\Delta T$  можно получить из оценок, полученных с помощью разных климатических моделей. Поскольку нашей целью является лишь качественный анализ отклика климатической системы на возмущение, здесь мы исходим из простейшего уравнения баланса энергии:

$$C d\Delta T(t) / dt = \Delta F(t) - \Delta T(t) / \lambda, \quad (2)$$

где  $\Delta F$  — внешнее воздействие;  $C$  и  $\lambda$  — теплоемкость и термическая чувствительность рассматриваемого «слоя» климатической системы, соответственно;  $t$  — время. Произведение  $C \lambda = \tau$  — время термической релаксации этого слоя.

Для того чтобы получить аналитическое решение уравнения (2), предположим, что внешнее воздействие определяется также простым выражением с экспоненциальной амплитудой и периодикой для  $\Delta F$ :

$$\Delta F_a(t) = A e^{\beta t} [1 + \eta \sin a(t - t_0)], \quad (3)$$

где  $A$  — размерная постоянная;

$a$  — рассматриваемая частота колебаний воздействия (начальный момент  $t_0$  определяется из условия  $\Delta F_a(t_0) = 0$ );

$\eta$  — амплитуда внешних возмущающих колебаний;

$\beta$  — параметр ее экспоненциального изменения со временем.

При  $\alpha = 0$  выражение (3) описывает экспоненциальное изменение воздействия с параметром  $\beta$ . При  $\eta = 1$  выражение (3) соответствует чисто периодическому внешнему воздействию, например, от атмосферных аэрозолей в арктической дымке (при наличии дымки сульфатные аэрозоли производят отрицательный эффект в зимние месяцы, исчезающий к концу года). Решение системы (2) и (3) с нулевыми начальными условиями имеет вид (4), где параметр  $\gamma = (\beta + \tau^{-1})/a$  можно назвать колебательным параметром.

$$\Delta T_a^\beta(t) = \frac{A}{C} \left\{ \left(1 - \frac{\eta\gamma^2}{1 + \gamma^2}\right) \frac{e^{\beta t} - e^{-t/\tau}}{\beta + \tau^{-1}} - \frac{\eta e^{\beta t}}{a(1 + \gamma^2)} [\cos a(t - t_0) - \gamma(1 + \sin a(t - t_0))] \right\}. \quad (4)$$

Выражение

$$\Delta T_0^\beta(t) = \frac{A(e^{\beta t} - e^{-t/\tau})}{C(\beta + \tau^{-1})} \quad (5)$$

соответствует чисто экспоненциальному росту радиационного воздействия в (3). Тогда в результате деления (4) на (5) получим следующее выражение для  $FRR$ :

$$FRR_a^\beta(H) = \frac{\Delta T_a^\beta(H)}{\Delta T_0^\beta(H)} = 1 - \frac{\eta\gamma^2}{1 + \gamma^2} - \frac{\eta\gamma[\cos a(H - t_0) - \gamma(1 + \sin a(H - t_0))]}{(1 + \gamma^2)(1 - e^{-a\gamma H})}. \quad (6)$$

Внешние факторы, приземная температура воздуха  $T$  и  $FRR$ , зависят от трех параметров: частоты форсинга  $a$ , времени релаксации  $\tau$  и коэффициента  $\beta$ , которые объединяются в единственный колебательный параметр  $\gamma$ . Переходный режим от начального условия в выражении (6) отражен в множителе  $1 - \exp(-a\gamma H)$ , близком к единице при  $H \rightarrow \infty$ .

Основные частоты колебаний в земной атмосфере: сезоны  $a_1 = 2\pi \text{ год}^{-1}$  и сутки  $a_2 = 2\pi \text{ сут}^{-1}$ . Величины  $\tau_1 = 10,7 \text{ год}$  (Shine et al., 2005) и  $\tau_2 = 58 \text{ сут}$ . — времена «термической релаксации» нижней атмосферы с учетом и без учета подстилающей поверхности — выбраны как репрезентативные для тропосферы. Величины колебательного параметра  $\gamma$  для этих частот указаны в таблице 1.

Таблица 1

Значения колебательного параметра  $\gamma$  и  $FRR$  для частот — сезонной  $a_1$  и суточной  $a_2$  и величины «разгонного» времени  $H_e$ .

$\beta_1$ (год <sup>-1</sup> )	0	0,01	0,02	0,10	$\beta_2$ (сут <sup>-1</sup> )	0	0,01	0,02	0,10
		$\tau_1 = 10,7$ год; $a_1 = 2\pi$ год <sup>-1</sup>					$\tau_2 = 58$ сут.; $a_2 = 2\pi$ год <sup>-1</sup>		
$\gamma$	0,0149	0,0157	0,0165	0,0309	$\gamma$	1,00	1,58	2,16	6,80
$FRR$	0,0149	0,0157	0,0165	0,0309	$FRR$	0,707	0,845	0,908	0,989
$H_e$ (год)	49,2	44,4	40,3	23,8	$H_e$ (сут)	267	169	124	39,2
		$\tau_1 = 10,7$ год; $a_2 = 2\pi$ сут <sup>-1</sup>					$\tau_2 = 58$ сут.; $a_2 = 2\pi$ сут		
$\gamma$	$4,09 \times 10^{-5}$	$4,50 \times 10^{-5}$	$4,76 \times 10^{-5}$	$8,45 \times 10^{-5}$	$\gamma$	$2,74 \times 10^{-3}$	$4,33 \times 10^{-3}$	$5,89 \times 10^{-3}$	$1,87 \times 10^{-2}$
$FRR$	$4,09 \times 10^{-5}$	$4,50 \times 10^{-5}$	$4,76 \times 10^{-5}$	$8,45 \times 10^{-5}$	$FRR$	$2,74 \times 10^{-3}$	$4,33 \times 10^{-3}$	$5,89 \times 10^{-3}$	$1,87 \times 10^{-2}$
$H_e$ (год)	49,2	44,4	40,3	23,8	$H_e$ (сут)	267	169	124	39,2

Параметр  $\beta = 0,02 \text{ год}^{-1}$  в первой строке табл. 1 выбран близким к величине  $\beta = 0,019 \text{ год}^{-1}$  для измеренной концентрации  $\text{CO}_2$  (см. ниже). Этой величине соответствует значение  $\gamma = 0,0165$  в табл. 1. Измеренная сезонная амплитуда межгодового роста концентрации  $\text{CO}_2$  в северном полушарии (Graven et al., 2013) приводит к близкой величине  $\gamma = 0,015$ .

В дополнение к суточным и сезонным колебаниям в климатической системе могут быть рассмотрены еще 11-летние колебания солнечной активности с

$$a_3 = 2\pi / 11 \text{ лет} = 0,571 \text{ год}^{-1} = 1,56 \times 10^{-3} \text{ сут}^{-1}.$$

Тогда значения параметра  $\gamma_3 = \tau_1^{-1} / a_3 = 0,164$  и  $\gamma_4 = \tau_2^{-1} / a_3 = 11,05$  становятся заметно большими, чем  $\gamma$  для сезонных изменений в табл. 1. Их следовало бы изучить в фазах этих колебаний активности Солнца с параметром  $\tau_2$ . С другой стороны, 11-летний цикл солнечной активности близок к  $\tau_1 = 10,7 \text{ год}$  — времени релаксации, используемому в (Shine et al., 2005), и поэтому возможно появление «резонанса» в нижней атмосфере. Работу (Misios, Schmidt, 2013) о роли океанов в передаче 11-летнего сигнала от Солнца в тропосферу можно рассматривать как один из первых шагов в изучении таких взаимодействий.

Для большинства случаев в табл. 1, за исключением величин, относящихся к комбинации  $a_1$  и  $\tau_2$ , значения параметра  $\gamma$  много меньше единицы. Отбрасывая члены порядка  $\gamma^2$  и малые относительно единицы начальные члены при  $H \rightarrow \infty$  из выражения (6), получаем:

$$FRR_a^\beta(H) = 1 - \eta\gamma \cos a(H - t_0), \quad (7)$$

то есть колебания  $FRR$  с амплитудой  $\eta\gamma \ll 1$ .

Для сезонных аэрозольных воздействий в свободной атмосфере со временем релаксации  $\tau_2$  и параметром  $\gamma$  порядка единицы из выражения (6) получается формула:

$$FRR_a^\beta(H, \gamma, \eta) = 1 - \gamma\eta(1 + \gamma^2)^{-1}[\cos a(H - t_0) - \gamma \sin a(H - t_0)]. \quad (8)$$

Это выражение представляет колебания с периодом  $2\pi/a_2$  и «размахом» (максимум минус минимум в формуле (8)):

$$FRR_a^\beta(H, \gamma, \eta, x_2) - FRR_a^\beta(H, \gamma, \eta, x_1) = 2\gamma\eta / \sqrt{1 + \gamma^2} \leq 2\eta, \quad (9)$$

где

$$tgx_{1,2} = -\gamma; \quad \cos x_{1,2} = \frac{\pm 1}{\sqrt{1 + \gamma^2}}; \quad FRR_a^\beta(H, \gamma, \eta, x_{1,2}) = \frac{1 \pm \gamma\eta}{\sqrt{1 + \gamma^2}}.$$

Как следует из этих выражений и как будет показано ниже, верхняя граница отклика  $FRR$  на возмущенный режим значительно меньше относительной амплитуды колебаний радиационного воздействия в выражении (3) для всех значений  $\gamma$ . Таким образом, предложенная здесь упрощенная модель указывает на незначительность термического отклика нижней атмосферы на любое из рассмотренных периодических внешних воздействий.

## **2. Сезонные колебания содержания углекислого газа в тропосфере северного полушария**

Эти колебания составляют климатический фактор, который еще не обсуждался должным образом (Аршинов и др., 2012; Sasaki et al., 2013; Graven et al., 2013; Zeng et al., 2014). Их частичный обзор в (Graven et al., 2013) показал значительный рост сезонной амплитуды содержания  $CO_2$  в тропосфере северного полушария со временем, сдвиг фазы к началу календарного года с увеличением широтного градиента «север — юг». Скорость увеличения сезонной амплитуды составляет 0,60 % в год по измерениям на обсерватории Барроу ( $71^\circ$  с. ш.) и 0,32 % в год на обсерватории Мауна Лоа ( $20^\circ$  с. ш.). В течение 2010 г. сезонная амплитуда содержания  $CO_2$  составила  $19 \text{ млн}^{-1}$  и  $7 \text{ млн}^{-1}$  в этих точках, соответственно. Детальный анализ в (Graven et al., 2013) показал текущее ускорение сезонного отбора  $CO_2$  из атмосферы растительностью суши (леса северных широт в теплое

полугодие) и прирост зеленой массы и урожая в агропроизводящих регионах.

Подробное исследование сезонных изменений концентрации  $\text{CO}_2$  в Западной Сибири (Томская область) проведено в приземном воздухе и в тропосфере (до уровня 7 км) в 1997—2011 гг. Положительный межгодовой тренд амплитуды сезонных колебаний  $\text{CO}_2$  в интервале 20—45  $\text{млн}^{-1}$  (с погрешностью 0,03  $\text{млн}^{-1}$ ) имел место в течение всего периода измерений (Аршинов и др., 2012; Sasakawa et al., 2013).

С 2004 г. наземные измерения производились в восьми точках в квадрате 51°20'—62°20' с. ш. и 62°20'—84°20' в. д. с использованием автоматических устройств LiCor 820 с оценкой ошибки 0,5  $\text{млн}^{-1}$ . Амплитуда сезонного цикла  $\text{CO}_2$  имеет максимум в регионе сибирской тайги и по имеющимся оценкам превышает его амплитуду в других регионах на Земле (Graven et al., 2013).

Часто для вычисления величины радиационного форсинга  $\text{CO}_2$  в нижней тропосфере используют простую формулу:

$$\Delta RF = 5,35 \ln (C/C_0), \quad (10)$$

где  $\Delta RF$  ( $\text{Вт/м}^2$ ) — изменение радиационного форсинга от текущего ( $C$ ) и базового ( $C_0$ ) отношений смеси  $\text{CO}_2$  (Muyhre et al., 1998; IPCC, 1990).

Позже это выражение подвергалось уточнениям, но тем не менее оно остается пригодным для практического применения и используется в настоящей работе. Параметры этого внешнего воздействия взяты из (Аршинов и др., 2012) при доиндустриальном уровне  $C_0 = 290 \text{ млн}^{-1}$ .

В основу таблицы 2 положены данные из работы (Graven et al., 2013). В столбцах 2, 3 и 4 представлены максимальные, минимальные и средние значения среднесезонных отношений смеси  $\text{CO}_2$ . В столбце 5 даны их амплитуды (разность значений в столбцах 2 и 3) и отношение этих амплитуд к средней величине из столбца 4. Вычисленный по формуле (10) радиационный форсинг для средних значений из столбца 4 приведен в столбце 6. В столбце 7 представлена разность между вычисленными по формуле (10) радиационными форсингами для значений из столбцов 2 и 3. Доля этой разности в

«среднем» радиационном форсинге (отношение значений в столбцах 7 и 6) указаны в столбце 8.

Таблица 2

**Годовые экстремальные значения  
среднесезонных отношений смеси CO<sub>2</sub> (млн<sup>-1</sup>),  
оценки их годового прироста и производимого им радиационного  
форсинга (Вт/м<sup>2</sup>) в течение ряда лет в тропосферном слое 0—7 км  
над Томской областью**

Год	(CO <sub>2</sub> ) <sub>max</sub>	(CO <sub>2</sub> ) <sub>min</sub>	(CO <sub>2</sub> ) <sub>mean</sub>	$\Delta(\text{CO}_2)$ (%)	$RF_{mean}$	$\Delta RF$	$\Delta RF/RF_{mean}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1998	378	350	364	28 (7,7)	1,22	0,41	0,338
2004	391	356	373	35 (9,4)	1,35	0,50	0,372
2005	390	364	379	26 (6,9)	1,43	0,37	0,258
2007	391	372	383	19 (5,0)	1,49	0,27	0,178
2010	400	372	386	28 (7,3)	1,53	0,39	0,254

Таблица 2 показывает, что сезонная амплитуда концентрации CO<sub>2</sub> в сибирском лесу меняется от 19 до 35 млн<sup>-1</sup>, что существенно выше сезонной амплитуды концентрации CO<sub>2</sub> на Барроу в 2010 г. (Graven et al., 2013). Отметим также, что измеренный средний годовой прирост CO<sub>2</sub> в 1,8 млн<sup>-1</sup> в год в Томской области в несколько раз меньше роста этой сезонной амплитуды.

Представленные значения показывают малый эффект сезонных колебаний концентрации CO<sub>2</sub> на величину  $FRR$ . Это подтверждает обоснованность их отбрасывания в вышеприведенных модельных оценках радиационного форсинга. Они останутся малыми и при величине  $\eta$  с относительной амплитудой, близкой к единице. Аналогичный вывод может быть получен для сезонных аэрозольных влияний в приземном слое воздуха на климатический режим (с учетом слоя грунта (океана)). Время релаксации этого слоя — порядка десяти лет — несравнимо с периодом сезонных колебаний.

### 3. Атмосферные эффекты сезонного таяния морского льда в Арктике как пример использования предлагаемых метрик

Наблюдения и модельные исследования указывают на два внешних источника текущего обсуждаемого потепления Арктики:

1) Сезонная потеря площади морского льда, приводящая к формированию тонкого слоя относительно теплого воздуха, прилегающего к тающему морскому льду.

2) Межсезонный приток энергии из более низких широт в нижней и средней тропосфере с переменной сезонной интенсивностью (Мелешко, Байдин, 2013; Байдин, Мелешко, 2014; Screen et al., 2012; Snape, Forster, 2014; Stroeve et al., 2014).

За последние 30 лет протяженность морского льда в области севернее  $70^{\circ}$  с. ш. сократилась почти на 27 % в ее годовых минимумах (в сентябре) и только на 6 % в ее годовых максимумах (в марте). Другим существенным фактором является поток тепла с поверхности арктических морей. Согласно измерениям (см. Мелешко, Байдин, 2013), среднегодовая температура поверхности океана в период 2002—2011 гг. возросла на  $0,29^{\circ}\text{C}$  по сравнению с периодом 1980—1989 гг. (аналогичное увеличение среднесезонных значений составило  $0,18$ ,  $0,15$ ,  $0,36$  и  $0,41^{\circ}\text{C}$  для зимы, весны, лета и осени соответственно).

Для определения величин *FRR* в области севернее  $70^{\circ}$  с. ш. используем измерения и данные реанализов изменений месячных температур поверхности океана — безледной (*SST*) и покрытой льдом (*SIC*) — между периодами: (I) 1980—1989 гг. и (II) 2002—2011 гг.

В таблице 3 представлены суммы абсолютных величин среднемесячных температур приводного воздуха в области  $70$ — $90^{\circ}$  с. ш. по данным реанализов ERA Interim и JRA-55 за периоды: (I) 1980—1989 гг. и (II) 2002—2011 гг. по полугодиям: (a) март—август; (b) сентябрь—февраль; (c) апрель—сентябрь; (d) октябрь—март. Так, индекс  $I_a$  у сумм температур относится к периоду март—август 1980—1989 гг., а индекс  $I_d$  — к периоду октябрь—март 2002—2011 гг. Индексы  $I_e$  и  $I_e$  охватывают годовые периоды, т. е. периоды I и II целиком. В скобках отмечены суммы только

положительных температур в полугодиях (отрицательные значения не учитываются).

Таблица 3

**Суммы абсолютных величин среднемесячных температур (°С) приводного воздуха в области 70—90° с. ш. по данным реанализов за периоды: (I) 1980—1989 гг. и (II) 2002—2011 гг.**

Вариант	Суммы абсолютных величин среднемесячных температур (°С)	
	Реанализ JRA-55	Реанализ ERA Interim
Ia	47,52 (3,24)	46,20 (4,11)
IIa	39,37 (5,55)	37,95 (5,68)
Ib	112	109
IIb	100	96,20
Ic	27,90 (3,24)	26,00 (4,11)
IIc	18,86 (5,55)	19,50 (5,68)
Id	132	129
IIд	120	116
Ie	165	161
IIe	134	129

Примечание:

(а) март—август; (b) сентябрь—февраль; (с) апрель—сентябрь; (d) октябрь—март; (е) полный год.

Таблица 4

**Значение индексов *FRR* (%) периодов (I) 1980—1989 гг. и (II) 2002—2011 гг., определенных по величинам из реанализов, представленным в табл. 3**

Вариант	<i>FRR</i> (%)	
	Реанализ JRA-55	Реанализ ERA Interim
IIa / Ia	82,8	82,1
IIb / Ib	89,3	88,3
IIc / Ic	67,6	75,0
IIд / Id	89,9	89,9
IIe / Ie	81,2	80,0

Из табл. 4, где указаны значения индексов  $FRR$  для периодов в XXI веке, видно хорошее согласие результатов обоих реанализов во все периоды, кроме полугодия «апрель—сентябрь» варианта С.

Далее с целью более детальной оценки эффекта сезонного таяния морского льда сравним изменения средней температуры нижней и средней тропосферы  $\Delta T_S$  в зоне  $70\text{—}90^\circ$  с. ш. во второй рассматриваемый период относительно первого (т. е. в 2002—2011 гг. относительно 1980—1989 гг.). На основе модельных расчетов (Мелешко, Байдин, 2013) образованы две группы метрик  $FRR$  — полугодовых осреднений  $\Delta T_S$ : метрики — (А) «радиационные»  $FRR_D^R$  («Полярный день» (март—август)) и  $FRR_N^R$  («Полярная ночь» (сентябрь—февраль)) и (В) «термические»  $FRR_C^T$  («Холодный период» (декабрь—май)) и  $FRR_W^T$  («Теплый период» (июнь—ноябрь)). В каждой из этих групп  $\Delta T_S$  усреднялись для трех вариантов условий на уровне моря: 1) Для не нулевых  $\Delta SST$  и  $\Delta SIC$ ; 2) Для  $\Delta SST = 0$  и  $\Delta SIC \neq 0$ ; 3) Для  $\Delta SST \neq 0$  и  $\Delta SIC = 0$ . Изменения осредненной по полугодиям и среднегодовой температуры  $\Delta T_S$  в 2002—2011 гг. относительно периода 1980—1989 гг. представлены в табл. 5. В ней столбцы, озаглавленные цифрами в круглых скобках, соответствуют абсолютным значениям прироста  $\Delta T_S$ , а столбцы с обозначениями в угловых скобках — долям  $\Delta T_S$  относительно основного варианта (например, отношение в вариантах В2 и В1  $1,24/1,65 \approx 0,749$  помещено в соответствующую графу столбца <1>). Также указаны отношения  $\Delta T_S$  между рассматриваемыми полугодиями (например, в варианте А1 частное от деления значений в столбцах (2) и (1)  $2,34/0,8 \approx 2,93$  представлено в столбце (2)/(1)) или аналогичные отношения между полугодовыми и среднегодовыми значениями (например, для варианта А3  $0,57/1,18 \approx 0,48$ ; см. столбец (1)/(3)).

Анализ и сравнение этих модельных вариантов показывает, что в группе А сезонные изменения в потоках радиации не влияют существенным образом на  $\Delta T_S$  у вариантов с учетом и без учета форсингов от  $\Delta SST$  и  $\Delta SIC$ . Но в группе В с изменениями термического (но не радиационного) режима поверхности океана эти форсинги производят примерно одинаковый 50%-ый рост в  $\Delta T_S$ .

Таблица 5

Изменения осредненной по полугодиям и среднегодовой температуры  $\Delta T_s$  в период 2002—2011 гг. относительно периода 1980—1989 гг. — абсолютные (столбцы (1), (2) и (3), в градусах Кельвина) и относительные (в долях единицы)

## А) Полярные день/ночь

№	Вариант	«День»		«Ночь»		«Ночь»/«День»		Среднегодовые		
		(1), К	<1>	(2), К	<2>	(2)/(1)	<2>/<1>	(3), К	(1)/(3)	(2)/(3)
A1	Основной	0,80	1,00	2,34	1,00	2,93	1,00	1,57	0,51	1,49
A2	A1 без $\Delta SST$	0,50	0,631	1,65	0,706	3,30	1,119	1,08	0,46	1,53
A3	A1 без $\Delta SIC$	0,57	0,713	1,79	0,765	3,14	1,079	1,18	0,48	1,52

## B) Зима./Лето

№	Вариант	«Лето»		«Зима»		«Зима»/«Лето»		Среднегодовые		
		(2)	<2>	(1)	<1>	<2>/<1>	(2)/(1)	(3)	(1)/(3)	(2)/(3)
B1	Основной	1,49	1,00	1,65	1,00	1,00	0,900	1,57	1,05	0,95
B2	B1 без $\Delta SST$	0,92	0,617	1,24	0,749	0,824	0,742	1,08	1,15	0,85
B3	B1 без $\Delta SIC$	1,24	0,832	1,12	0,677	1,229	1,107	1,18	1,037	1,05

Такое потепление вызвано ростом  $\Delta SST$  в варианте В3 и сокращением площади льда в варианте В2, когда оба эти форсинга дают почти одинаковый вклад в эволюцию  $\Delta T_S$ . Таким образом, исключение изменений в теплосодержании воды в модели в указанные периоды производит более значимый эффект, чем исключение изменений площади ледового покрова, в то время как  $\Delta T_S$  в эксперименте А с учетом изменений  $SST$  и  $SIC$  статистически не различаются. Эти соотношения также свидетельствуют, что изменение площади льда в светлую часть года влияет на температуру воздуха меньше, чем тренды  $SST$ , «работающие круглый год» (Сорокина, Эзау, 2011; Байдин, Мелешко, 2014). Одновременно также имеет место меньшее по величине потепление во всей тропосфере Северного полушария, но его причина другая — на это указывает летнее потепление во всей атмосфере, которое не может быть связано с изменением площади ледяного покрова и холодной поверхности океана.

Данные наблюдений за период 1980—2011 гг. показывают, что самое значительное сокращение ледяного покрова в Арктике в конце лета произошло на относительно мелких морях, примыкающих к Евразии (преимущественно от моря Лаптевых до моря Бофорта). С наступлением осени и понижением температуры атмосферы там формируется самая крупная положительная термическая аномалия, которая, смещаясь на восток, достигает максимума своего развития во второй половине октября ( $12,7 \pm 3,7$  °С). В ноябре она ослабевает и стабилизируется в Чукотском море; затем, в декабре, затухает. Поскольку осенью статическая устойчивость полярной тропосферы невелика, потепление воздуха в это время года распространяется от поверхности океана на более высокие уровни.

Несколько другой анализ механизма арктического потепления представлен в (Screen et al., 2012), где использованы модели общей циркуляции атмосферы с разрешением, близким к разрешению модели ГГО. В этих численных экспериментах (для периода 1979—2008 гг.) используются несколько заданных и наблюдаемых краевых условий для  $SST$  и  $SIC$ . В некоторых из этих условий изменения введены лишь в области условий  $SIC$  и приняты

исходными климатическими в других областях. Солнечная постоянная, а также содержание газов и аэрозолей, влияющих на атмосферную радиацию, заданы или приняты стандартными климатически неизменными. Статистически достоверные сравнения результатов этих экспериментов определенно показывают, что приповерхностное потепление воздуха в Арктике в сентябре—декабре образуется от таяния морского льда. Наоборот, однородное по вертикали сильное потепление, наблюдаемое в мае—августе на  $40\text{—}50^\circ$  с. ш., в основном вызвано переносом тепла к полюсам из атмосферы низких широт. Этот перенос, а не таяние морского льда, и является главным двигателем усиления потепления в Арктике. Эти рассуждения показывают, что современное сезонно изменяющееся усиление потепления, связанное с таянием морского льда, еще не является главным двигателем долговременного потепления Арктики.

### **Заключительные замечания**

Новые метрики, предлагаемые для оценки эффекта внешнего воздействия на климатический режим атмосферы ( $FRR$  и колебательный параметр  $\gamma$ ), позволяют оценить вместе радиационный форсинг и реакцию на его использование в оценках сезонных колебаний отклика температуры на изменение содержания  $\text{CO}_2$  в воздухе и углерода в атмосферных аэрозолях (например, «черного углерода»). В этих простых случаях получены аналитические выражения — решения элементарного уравнения баланса энергии. При учете некоторых наблюдаемых аспектов текущего процесса потепления Арктики получен тот же качественный результат: сезонное уменьшение протяженности морского льда играет второстепенную роль в потеплении Арктики.

Простые аналитические выражения  $FRR$  и  $\gamma$ , приведенные выше, дают некоторые количественные представления очевидному факту: короткопериодные сезонные радиационные воздействия аэрозолей и  $\text{CO}_2$  не могут вызвать заметную реакцию приземной климатической температуры в режиме с величиной времени релаксации  $\tau$  в несколько лет для любых рассмотренных параметров  $\gamma$  и  $\eta$ . Заметный эффект

здесь может быть произведен лишь в свободной атмосфере, не связанной с подстилающей поверхностью и имеющей время релаксации  $\tau$  в несколько месяцев. Этот эффект получен и подтвержден многими наблюдениями и модельными оценками. Здесь могут быть перспективными исследования эффекта 11-летнего солнечного цикла в нижней тропосфере и в верхнем слое океана. Эти результаты демонстрируют значение простых средств в изучении природных явлений сложными средствами — моделями общей циркуляции атмосферы и подстилающей поверхности Земли.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Аришинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К., Креков Г. М., Фофонов А. В., Бабченко С. В., Иноуйе Г., Мачида Т., Максюттов Ш. Ш., Сасакава М., Шимояма К.* (2012). Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. Т. 25. № 12. С. 1051—1061.

*Байдин А. В., Мелешко В. П.* (2014). Реакция атмосферы высоких и умеренных широт на сокращение площади морского льда и повышение температуры поверхности океанов // Метеорология и гидрология. № 6. С. 5—17.

*Кароль И. Л., Киселёв А. А., Генихович Е. Л., Чичерин С. С.* (2013). Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климата // Известия РАН. ФАО. Т. 49. № 5. С. 503—522.

*Мелешко В. П., Байдин А. В.* (2013). Реакция климата атмосферы на сокращение площади льда в Арктике и на другие внешние воздействия за последние десятилетия // Труды ГГО. Вып. 568. С. 80—117.

*Сорокина С. И., Эзау И. Н.* (2011). Меридиональный поток энергии в Арктике по данным архива радиозондирования IGRA // Известия РАН. ФАО. Т. 47. № 5. С. 622—633.

*Graven H. D., Keeling R. F., Piper S. C., Patra P. K., Stephens B. B., Wofsy S. C., Welp L. R., Sweeney C., Tans P. P., Kelley J. J., Daube B. C., Kort E. A., Santoni G. W., Bent J. D.* (2013). Enhances seasonal exchange of CO<sub>2</sub> by Northern Ecosystems since 1960 // Science. V. 341. P. 1085—1089. DOI: 10.1126/science.1239207.

IPCC (1990). Climate Change / The IPCC Scientific Assessment / J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums eds. — Cambridge, UK: Cambridge University Press. 365 p. (Ch. 2).

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung,

A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley eds. — Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.

*Misios S., Schmidt H.* (2013). The role of the oceans in shaping the tropospheric response to the 11 year solar cycle // *Geophysical Research Letters*. DOI: 10.1002/2013GL058439.

*Molina M., Zaelke D., Madhava Sarma K., Andersen A. O., Ramanathan V., Kanariu D.* (2009). Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO<sub>2</sub> emissions // *Proceedings of National Academy of Sciences*. V. 106. № 49. P. 20616—20621.

*Myhre G., Highwood E. J., Shine K. P., Stordal F.* (1998). New estimates of radiative forcing due to well-mixed greenhouse gases // *Geophysical Research Letters*. V. 25. P. 2715—2718.

*Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O.* (2013). Aircraft and tower measurements of CO<sub>2</sub> concentrations in the planetary boundary layer and lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long term records from 2002 to 2011 // *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*. V. 118. DOI: 10.1002/Jgrd.50755.

*Screen J. A., Deser C., Simmonds I.* (2012). Local and remote controls on observed Arctic warming // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L10709. DOI:10.1029/2012GL051598.

*Shindell D., Borgford-Parnell N., Brauer M., Haines A., Kyulenstierna J. C. I., Leonard S. A., Ramanathan V., Ravishankara A., Amann M., Srivastava L.* (2017). A climate policy pathway for near- and long-term benefits // *Science*. V. 356. Issue 6337. P. 493—494.

*Shine K. P., Fuglestedt J. S., Hailemariam K., Stuber N.* (2005). Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases // *Climate Change*. V. 68. P. 281—302.

*Snape T. J., Forster P. M.* (2014). Decline of Arctic sea ice: Evaluation and weighting of CMIP5 projections // *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*. V. 119. P. 546—554. DOI: 10.1002/2013JD020593.

*Stroeve J. C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A.* (2014). Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // *Geophys. Res. Lett.* V. 41. DOI: 10.1002/2013GL058951.

*Zeng N., Zhao F., Collatz G. J., Kalnay E., Salawitch R. J., West T. O., Guanter L.* (2014). Agricultural Green Revolution as a driver of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> seasonal amplitude // *Nature*. V. 515. P. 394—397. DOI: 10.1038/nature13893.

**ПРОСТОЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОПОТОКОВ ГАЗОВ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДИК  
КОЛИЧЕСТВЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВОЗДУХА  
(НА ПРИМЕРЕ ФОРМАЛЬДЕГИДА,  
ФТОРИСТОГО ВОДОРОДА И ФЕНОЛА)**

*Н. Ш. Вольберг, А. А. Успенский, И. Г. Гуревич, А. В. Степаков*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

E-mail: volberg@main.mgo.rssi.ru, uspieni@inbox.ru,

atm\_gyrevich@mail.ru, alstepakov@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.10.2017

Поступила после доработки 15.12.2017

Микропотоки газов с известной микроконцентрацией летучих веществ, полученные с помощью диффузионных методов, широко используются для контроля, анализа и метрологического обеспечения газоаналитической аппаратуры и методик количественного химического анализа воздуха (Pitakarnnop et al., 2010; Zhang et al., 2012). В качестве корпуса для диффузионных источников микропотока обычно используют фторопластовые газопроницаемые трубки, диаметр и толщина стенок которых определяются исходя из величины давления насыщенных паров (от 0,01—2,5 МПа) (Kruczek and Lashkari, 2012; Veenstra et al., 1999). Поэтому толщина стенки должна быть достаточно большой (до 1,5 мм), а это, в свою очередь, приводит к снижению удельной проницаемости стенок и повышению влияния температуры на производительность источника. Изменяя температуру, диаметр диффузионной трубки, длину диффузионного пути и расход газа-разбавителя, можно получить широкий диапазон концентраций вещества в смеси.

Стоит отметить, что из-за сравнительно небольшого объема вещества в газопроницаемом корпусе (внутренний диаметр до 5 мм) срок работы диффузионных источников микропотока невелик, и составляет от нескольких месяцев до года. После указанного срока в результате падения концентрации дозируемого вещества получение паровоздушных смесей диффузией через газопроницаемую стенку может отличаться недостаточной точностью. Для получения диффузионных источников микропотока требуются достаточно чистые вещества. Наличие примесей приводит к образованию на поверхности газопроницаемой трубки мешающих динамических пленок.

Несмотря на широкое распространение, стандартные источники микропотоков газов имеют достаточно высокую стоимость, что ограничивает их использование в сетевых лабораториях мониторинга окружающей среды, где основными средствами контроля являются методы количественного химического анализа воздуха. Для нужд таких лабораторий нами предложен простой метод создания парофазных смесей, основанный на методе полного испарения точно дозированного объема водного раствора компонента известной концентрации в токе воздуха. Данный метод, отличающийся простотой, применяется для контроля погрешности методик определения формальдегида (РД 52.04.823—2015), фенола (РД 52.04.799—2014) и фтористого водорода (РД 52.04.797—2014) в атмосферном воздухе.

Установка для получения смесей (рис. 1) состоит из следующих элементов: компрессора, узла очистки воздуха, испарителя дозируемого вещества и поглотителя. Узел очистки воздуха включает две очистные колонки (2 и 3) заполненные силикагелем (или молекулярными ситами) и карбонатом кальция, а также аэрозольный фильтр (6), помещенный в патрон. Испаритель компонента (8) представляет собой тefлоновую (для фтористого водорода) или стеклянную (для фенола и формальдегида) трубку, в которую помещается раствор дозируемого вещества определенной концентрации, объемом несколько микролитров. В качестве поглотителей (10 и 11) были использованы поглотитель Рыхтера (для

формальдегида) или сорбционные трубки СТ (СТ-4 для фенола и СТ-2 для фтористого водорода).

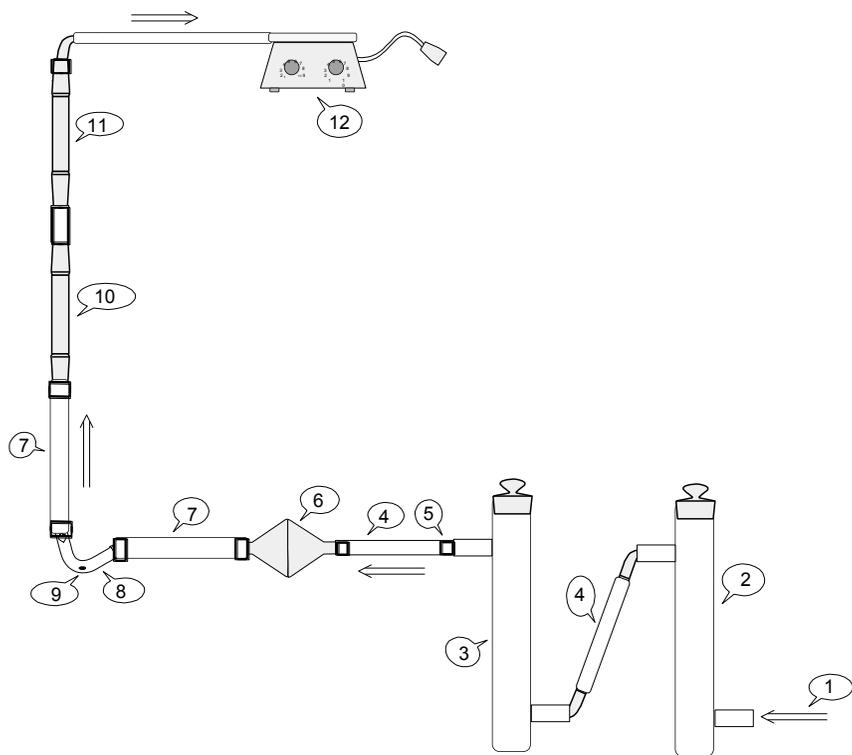


Рис. 1. Схема установки для получения микропотоков газов:

- 1 — направление потока газа-разбавителя; 2 — очистная колонка;
- 3 — осушительная колонка; 4 — силиконовый соединительный шланг;
- 5 — силиконовая муфта; 6 — аэрозольный фильтр; 7 — фторопластовая соединительная трубка; 8 — стеклянный или фторопластовый испаритель;
- 9 — аликвота раствора дозируемого вещества; 10 — поглотитель 1;
- 11 — поглотитель 2; 12 — компрессор.

Испаритель, содержащий точно дозированный объем водного раствора с известной концентрацией анализируемого компонента, присоединяют одним выходом к входной части поглотителя через фторопластовую или силиконовую трубку. Ко второму выходу из испарителя через систему гибких силиконовых шлангов последовательно подсоединяют патрон с противоаэрозольным фильтром (особенно важно для экспериментов с фтористым водородом) и очистную колонку. К выходу из поглотителя подсоединяют воздушный компрессор. С помощью компрессора через систему прокачивают воздух с заданной скоростью (в зависимости от анализируемого компонента) до полного испарения капли раствора. При этом компонент аккумулируется в поглотителе и анализируется с помощью соответствующих стандартных методик. Используя данный метод создания «временного» микропотока, можно проводить оценку эффективности метода анализа через критерий «задано-найденно». Зная точное количество анализируемого компонента в дозируемом объеме и найденное в поглотителе после стадии испарения, можно определить *погрешность* методики измерения в условиях отбора пробы (в серии экспериментов следует дозировать пробы одинакового объема с разной концентрацией анализируемого вещества). На стадии отбора проб наиболее значимой является погрешность, обусловленная неполнотой улавливания компонента.

Рассмотрим примеры оценки погрешности методик измерения при анализе на фторид водорода, формальдегид и фенол с использованием капельного дозатора. При анализе на фторид водорода отбор проб производился в две последовательно соединенные сорбционные трубки СТ2, пропитанные поглотительным раствором. В испаритель, соединенный с сорбционной трубкой тефлоновым шлангом, вводилось 10 мкл водного раствора HF, содержащего около 10 мкг фторида водорода. Через систему пропускаться поток очищенного воздуха с расходом 3 дм<sup>3</sup>/мин. Пропускание воздуха продолжалось до полного испарения капли раствора (30 мин). При отборе проб величина проскока (%) оценивалась на основании результатов, представленных в таблице 1 и рассчитывалась по формуле:

$$П\% = \frac{q_2}{q_1 + q_2} \times 100, \quad (1)$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — содержание HF (мкг), найденное в сорбционных трубках, соединенных последовательно.

Как следует из таблицы 1, максимальная погрешность от неполноты поглощения из-за проскока ( $\theta_{пр.}$ ) не превышает 4,4 %.

Таблица 1

**Определение проскока при отборе проб фторида водорода от источника его микропотока (с использованием капельного дозатора)**

№ п/п	Задано HF, мкг	Найдено HF в пробе, мкг		Суммарное количество HF в двух сорбционных трубках, мкг	Проскок, %
		1-ая СТ	2-ая СТ		
1	9,6	8,9	0,3	9,2	3,3
2		9,0	0,2	9,2	2,2
3		9,2	0,1	9,3	1,1
4		8,9	0,3	9,2	3,3
5		9,0	0,2	9,2	2,2
6		9,2	0,2	9,4	2,1
7		9,0	0,3	9,3	3,2
8	9,9	9,4	0,2	9,6	2,1
9		9,2	0,1	9,3	1,1
10		9,2	0,3	9,5	3,2
11	9,4	8,7	0,4	9,1	4,4
12		9,0	0,1	9,1	1,1
13		8,8	0,3	9,1	3,3
14		8,7	0,2	8,9	2,2
15		8,8	0,2	9,0	2,2
Среднее	9,6	9,0	0,2	9,2	2,2

Аналогично оценивались погрешности методики измерения концентрации формальдегида. При определении  $\theta_{пр}$  проводилось экспериментальное определение массы формальдегида в двух последовательно соединенных поглотительных приборах Рыхтера. В стеклянный испаритель, соединенный с поглотительным прибором, вводились порции водного раствора формальдегида (10—30 мкл), содержащие различные концентрации компонента. Через систему пропусклся поток очищенного воздуха с расходом 2 дм<sup>3</sup>/мин. Пропускание воздуха продолжалось до полного испарения введенной пробы раствора (30 мин). По массе формальдегида во втором поглотительном приборе (проскоку) судили об эффективности улавливания формальдегида поглотительным раствором (данные приведены в таблице 2). Определение массовой концентрации проводилось согласно МВИ, при этом для больших концентраций производили разбавление, и концентрация измерялась в ряде аликвот пробы. За значение принималось среднее из полученного ряда данных. Расчет проскока производили по формуле 1.

Таблица 2

**Определение проскока при отборе проб  
формальдегида от источника его микропотока**

№ п/п	Масса формальдегида, мкг/пробе		П, %
	1 поглотитель	2 поглотитель	
1	3,1	0,12	3,2
2	4,0	0,15	3,3
3	4,5	0,16	3,2
4	4,6	0,17	3,5
5	5,4	0,25	4,3
6	5,9	0,31	4,8
7	6,8	0,35	4,9
8	7,9	0,47	5,2
9	8,2	0,46	5,1
10	9,1	0,53	5,3
11	9,8	0,6	<b>5,7</b>

При экспериментальной оценке погрешности методики измерения концентрации фенола отбор проб производился в две последовательно соединенные сорбционные трубки СТ4, пропитанные поглотительным раствором. При проведении эксперимента в испаритель вводились аликвоты спиртового раствора фенола (6—13 мкл), содержащие 7—15 мкг компонента. Через систему пропускался поток воздуха с расходом 5 дм<sup>3</sup>/мин. Пропускание воздуха продолжалось до полного испарения капли раствора (30 мин). Величина проскока (%) определялась на основании данных, представленных в таблице 3 и рассчитывалась по формуле 1.

Таблица 3

**Полнота улавливания фенола на сорбционные трубки СТ-4  
(раствор фенола в этаноле (для мкл); скорость 5 л/мин;  
время 20 мин, 1 трубка СТ-4)**

Найдено в пробе, мкг	Проскок		V спиртового раствора фенола, мкл
	%	мкг	
7,5	0,36	0,027	6
7,4	0,5	0,037	6
7,4	0,9	0,067	6
10,5	0,9	0,095	10
10	0,9	0,09	10
15	0,36	0,054	13
15	0,18	0,027	13

*Итого:* средние значения проскока: 0,59%

Минимальная величина проскока: 0,18%

Максимальная величина проскока: 0,9%

СКО 0,3

*Вывод:* из приведенных в таблице 3 данных видно, что трубка СТ-4, пропитанная 0,6 мл поглотительного раствора, обеспечивает полное улавливание фенола при расходе воздуха 5 дм<sup>3</sup>/мин.

Для оценки полноты переноса анализируемого компонента из *испарителя* в поглотительный прибор проводят параллельные эксперименты, в которых аналогичную пробу вводят непосредственно в поглотитель (для фтористого водорода и фенола) или в пробирку с поглотительным раствором (для формальдегида), и анализируют вместе с пробой, полученной в результате испарения аликвоты раствора. Данный подход также позволяет оценить ряд мешающих факторов, которые могут иметь место в условиях микропотока, таких как сорбция компонента на поверхности полимерной трубки и частичный унос с током газа разбавителя.

### **Заключение**

Предложенный метод дозирования может быть использован: при разработке методик контроля качества воздуха, для проведения внешнего контроля качества анализа в сетевых лабораториях с учетом стадии отбора проб и для контроля исправности автоматических газоанализаторов. Он позволяет дозировать микроколичества газов в широком диапазоне значений масс и может применяться для дозирования стабильных веществ, полностью испаряющихся в объеме пробы воздуха регламентированном методикой.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

РД 52.04.797-2014. (2014). Массовая концентрация фторида водорода в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с использованием ксиленолового оранжевого — СПб: Моби-Дик. 48 с.

РД 52.04.823-2015. (2016). Массовая концентрация формальдегида в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с использованием ацетилацетона — СПб: Моби-Дик. 48 с.

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

*Veenstra T. T., Lammerink T. S. J., Elwenspoek M. C., van den Berg A.* (1999). Characterization method for a new diffusion mixer applicable in micro flow injection analysis systems // *J. Micromech. Microeng.* V. 9. P. 199—202.

*Kruczek B., Lashkari S.* (2012). Challenges in Microflow Measurements // *Flow Measurement*. Ed. G. Urquiza. Published by InTech. Rijeka, Croatia. P. 3—36.

*Pitakarnnop J., Varoutis S., Valougeorgis D., Geoffroy S., Baldas L., Colin S.* (2010). A novel experimental setup for gas microflows // *Microfluid Nanofluid.* V. 8. P. 57—72.

*Zhang W.-M., Meng G., Wei X.* (2012). A review on slip models for gas microflows // *Microfluid Nanofluid.* V. 13. P. 845—882.

## О КОНТРОЛЕ ОСАДКОВ ИЗ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ

*Л. В. Кашлева<sup>1</sup>, Нго Динь Хи<sup>1</sup>, Ю. П. Михайловский<sup>2</sup>*

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

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

Поступила в редакцию 18.08.2017  
Поступила после доработки 23.10.2018

### Введение

Сильные ливни представляют опасность для многих отраслей производственной деятельности людей. Прежде всего, это относится ко всем видам транспорта, включая авиацию, автотранспорт, а также работу наземных систем и средств связи. Поэтому успешное штормоповещение и штормпредупреждение о сильных дождях является одной из наиболее актуальных задач оперативной метеорологии.

Источником информации об осадках является государственная метеорологическая сеть. Используемые при проведении наблюдений приборы — осадкомеры и плювиограф — позволяют проводить прямые измерения количества осадков и их интенсивности. Недостаток информации метеорологической сети — временная и пространственная дискретность получаемых данных, которая не позволяет получать репрезентативные оценки количества и интенсивности осадков для больших территорий (Восканян и др., 2013). Например, даже интенсивные осадки из конвективных облаков, часто выпадающие кратковременно на ограниченной площади, по данным метеорологической сети могут быть не зафиксированы. При

исследованиях облаков и связанных с ними осадков получил распространение радиолокационный метод, обеспечивающий непрерывное получение информации, как во времени, так и в пространстве. Однако при всех своих очевидных достоинствах радиолокационный метод является косвенным, т. к. он обеспечивает измерение не осадков и их интенсивности, а отражаемости от них под облаком. При этом радиолокационный метод из-за кривизны земной поверхности позволяет получать данные об осадках в радиусе от локатора, не превышающем 90 км летом и 50 км зимой. Для расширения возможностей радиолокационного метода чрезвычайно важно найти способ расширения радиуса обнаружения и исследования областей выпадения осадков. Совершенствование методов штормового предупреждения об осадках на расстояниях свыше 90 км от пункта наблюдения представляет актуальную и практически значимую задачу радарной метеорологии.

В настоящей работе предлагается возможный вариант решения этой задачи — оценка интенсивности осадков по данным о радиолокационных параметрах самого облака выше его нижней границы. Такие измерения позволяют получать информацию об осадках для значительно больших расстояний чем измерения в подоблачном слое.

## 1. Постановка задачи и предварительные оценки

Для определения интенсивности осадков из кучево-дождевых облаков (Cb) радиолокационным методом используется связь между интенсивностью осадков ( $I$ , мм/ч) и радиолокационной отражаемостью ( $Z$ , мм<sup>6</sup>/м<sup>3</sup>) под облаком (Мазин, Шметер, 1983).

Связь  $Z$  и  $I$  выражается формулой:

$$Z = AI^b, \quad (1)$$

где  $A$  и  $b$  — эмпирические коэффициенты.

Одним из путей решения задачи контроля осадков из конвективных облаков на расстоянии, превышающем 90 км от

локатора, является выявление связи между отражаемостью под облаком, по которой определяется интенсивность осадков в соответствии с Руководством (1993), и радиолокационными характеристиками облака. Такой подход представляется легко осуществимым при автоматизации радиолокационных наблюдений.

В работе использованы радиолокационные данные, получаемые при проведении наблюдений по стандартной программе для сети радиолокационных наблюдений: логарифм отражаемости под облаком —  $\lg Z_1$  (интенсивность осадков), логарифм отражаемости внутри облаков —  $\lg Z_2$ ,  $\lg Z_3$ , вертикальная протяженности облака и отдельных его слоев (Руководство, 1993).

Рассмотрим существующие представления о связях различных параметров облаков с интенсивностью выпадающих осадков и изменениях этих связей в процессе развития облаков.

## **2. Кучево-дождевое облако — стадии развития и параметры, определяющие интенсивность процесса осадкообразования**

На протяжении жизни кучево-дождевое облако от формирования до разрушения проходит три стадии эволюции: рост, зрелость, диссипация (Мазин, Шметер, 1983).

Первая стадия (стадия роста) начинается с момента развития кучевого облака, которое при благоприятных условиях быстро растет по вертикали. Вершина облака на этой стадии достигает уровня отрицательных температур, поэтому его верхняя часть состоит из переохлажденных капель. Отличительной особенностью первой стадии развития мощного кучево-дождевого облака является преобладание в нем восходящих потоков воздуха. Дальнейший рост мощного кучевого облака приводит к тому, что его верхняя часть попадает в зону все более низких температур. Вследствие этого часть переохлажденных капель замерзает и превращается в ледяные кристаллы. Состав облака становится смешанным (переохлажденные капли и кристаллы льда), в результате чего в нем начинается укрупнение облачных элементов и образование осадков.

Формирующиеся в облаке осадки до земли не доходят. Грозовые явления в облаке отсутствуют.

Вторая стадия развития кучево-дождевого облака — стадия зрелости — начинается с момента, когда его верхняя часть перестает расти вверх и приобретает вид огромной «наковальни». В этой стадии из облака выпадают наиболее интенсивные осадки (Мазин, Шметер, 1983). Грозовые явления возникают в облаке в том случае, если оно в своем развитии достигло уровня изотермы  $-22,5^{\circ}\text{C}$ . Этот уровень называют уровнем интенсивной кристаллизации. Если же вершина облака располагается ниже этого уровня, то электрические разряды, как правило, не наблюдаются. В стадии зрелости (максимального развития) облако без видимых изменений может существовать в течение десятков минут.

Третья (заключительная) стадия жизни кучево-дождевого облака является стадией его диссипации или разрушения, она характеризуется наличием в нем преобладающего нисходящего потока. Размывание кучево-дождевого облака начинается снизу. По мере ослабления осадков ослабевает и нисходящий поток воздуха.

Полный цикл жизни отдельного кучево-дождевого облака составляет от одного до полутора часов. Если облако многоячейковое, то продолжительность его жизни может достигать нескольких часов (Мазин, Шметер, 1983; Абшаев и др., 2009).

Отметим, что для каждой стадии эволюции облака характерен свой специфический профиль радиолокационной отражаемости (Синькевич и др., 2016; Абшаев и др., 2009; Heymsfield, 2000).

Профили радиолокационной отражаемости отдельного кучево-дождевого облака на стадиях его эволюции представлены на рис. 1. В стадии роста вертикальный профиль  $\lg Z(H)$  симметричен относительно уровня наибольшего значения отражаемости в облаке. Выше и ниже уровня  $\lg Z_{\text{макс}}$  радиолокационная отражаемость достаточно быстро убывает.

В стадии зрелости Cb (в период выпадения интенсивных осадков) вертикальный профиль  $\lg Z(H)$  слабо меняется по высоте. При этом обычно отмечается существенное увеличение верхней границы облака и значений  $\lg Z$  по сравнению со стадией роста.

В стадии распада верхняя граница облака понижается, вертикальный профиль  $\lg Z(H)$  меняется: максимальное значение  $\lg Z_{\text{макс}}$  наблюдается в нижней части облака, уровень максимума  $\lg Z$  постепенно снижается по мере разрушения облака.

Наиболее продолжительна стадия зрелости — до десятков минут. Продолжительность стадии роста и диссипации не превосходит 15—20 мин.

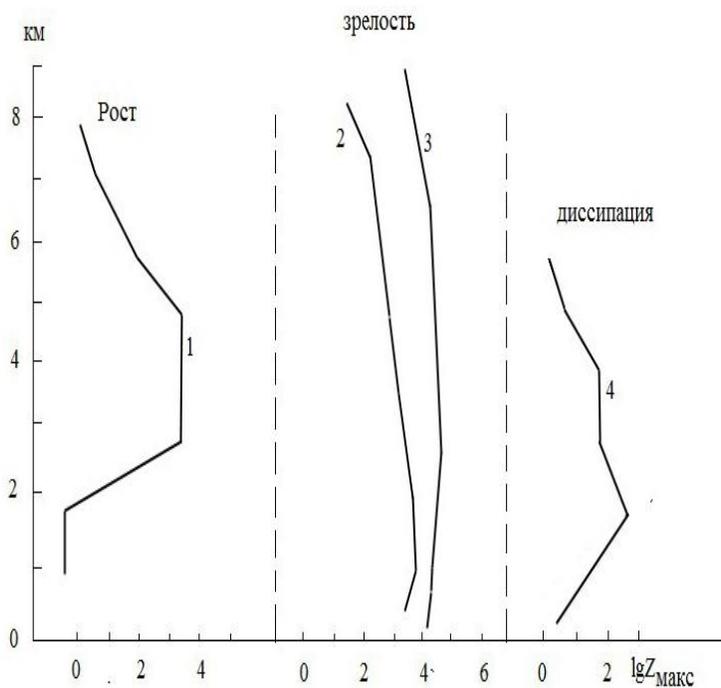


Рис. 1. Типичные профили радиолокационной отражаемости  $\lg Z(H)$  кучево-дождевого (Cb) облака на различных стадиях его развития (Руководство, 1993).

1 — стадия роста; 2, 3 — стадия зрелости; 4 — стадия диссипации.

Одним из основных параметров, определяющих интенсивность ливневых осадков, является толщина слоя облака выше уровня нулевой изотермы (толщина переохлажденной части облака). Причина этого состоит в том, что в умеренных и высоких широтах для выпадения осадков даже средней интенсивности необходимо наличие в облаках переохлажденной части с ледяной фазой (Матвеев, 2000; Абшаев, 2009). Чем больше толщина переохлажденной части облака, тем до больших размеров могут вырасти частицы осадков. При этом частицы осадков, сформированные в переохлажденной части облака, продолжают расти в теплой части облака до его нижней границы.

Таким образом, для анализа процесса осадкообразования и оценки интенсивности осадков информативными представляются следующие параметры: вид вертикального профиля радиолокационной отражаемости, мощность облака и толщина его переохлажденной части.

### 3. Описание исходного материала

Для анализа были собраны радиолокационные данные об осадках, полученные на МРЛ-5, установленном на экспериментальной базе ГГО в п. Воейково, в теплое время года за период с 2006 по 2009 гг.:

- логарифм радиолокационной отражаемости под облаком  $\lg Z_1$  (на высоте 1 км);
- логарифм радиолокационной отражаемости облака на уровне нулевой изотермы ( $\lg Z_2$ );
- логарифм радиолокационной отражаемости облака  $\lg Z_3$  (на уровне, превышающем нулевую изотерму на  $2 \div 2,5$  км и являющимся уровнем интенсивной кристаллизации);
- высота верхней границы облака  $H_{вг}$ ;
- критерий грозоопасности  $Y = H_{вг} \cdot \lg Z_3$ .

Высота верхней границы облака определялась по уровню отражаемости  $\lg Z = -1$ .

Для получения высоты нулевой изотермы ( $H_0^{\circ}\text{C}$ ) использовались данные радиозондирования. Это позволило для каждого облака рассчитать толщину его переохлажденной части.

#### 4. Результаты анализа

На первом этапе были проанализированы связи между радиолокационной отражаемостью под облаком и внутри его для всех облаков независимо от стадии их развития. Для всех отобранных случаев связь между  $\lg Z1$  и остальными радиолокационными параметрами ( $\lg Z2$ ,  $\lg Z3$ , Нв.г.) была установлена с помощью статистического регрессионного метода (Викулов, 2004). В результате было получено уравнение множественной регрессии:

$$\lg Z1 = 0,55 + 0,47 \cdot \lg Z2 - 0,09 \cdot \lg Z3 + 0,018 \cdot \text{Нв.г.} \quad (2)$$

Анализ имеющихся экспериментальных данных показал, что связь отражаемости под облаком ( $\lg Z1$ ) с отражаемостью на уровне нулевой изотермы ( $\lg Z2$ ) весьма слабая, коэффициент корреляции составил лишь 0,37 (см. рис. 2). Такой результат обусловлен тем, что при построении рис. 2 использовались данные по облакам, находящимся на всех трех стадиях развития.

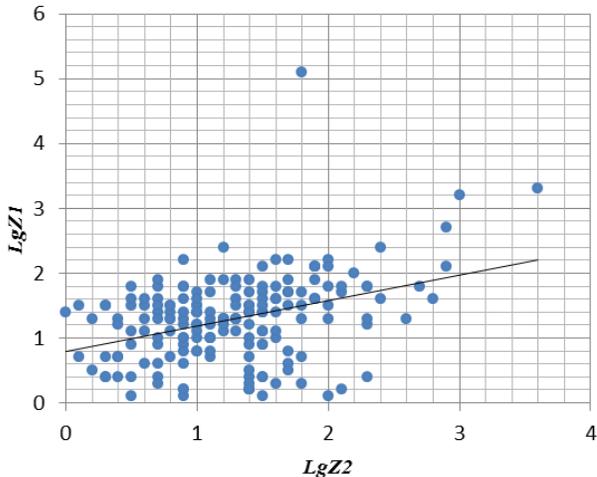


Рис. 2. Связь между  $\lg Z1$  и  $\lg Z2$  по данным МРЛ.

Как было показано в предыдущем разделе, вертикальный профиль радиолокационной отражаемости и, соответственно, соотношения  $\lg Z1$  и  $\lg Z2$  меняются в зависимости от стадии эволюции облака. Для оценки потенциальной интенсивности осадков, выпадающих из зоны исследуемых облаков, логично рассматривать облака, находящиеся в стадии максимального развития и стадии роста, и не учитывать облака, находящиеся в стадии диссипации.

В качестве критерия определения стадии развития и зрелости облаков можно принять условие  $\lg Z1 < \lg Z2$ . На основании данных о таких облаках было построено искомое регрессионное соотношение  $\lg Z1$  и  $\lg Z2$  и получена зависимость отражаемости под облаком ( $\lg Z1$ ) от отражаемости на уровне нулевой изотермы ( $\lg Z2$ ) с различной накопленной вероятностью в радиусе 90 км от радиолокатора (см. рис. 3).

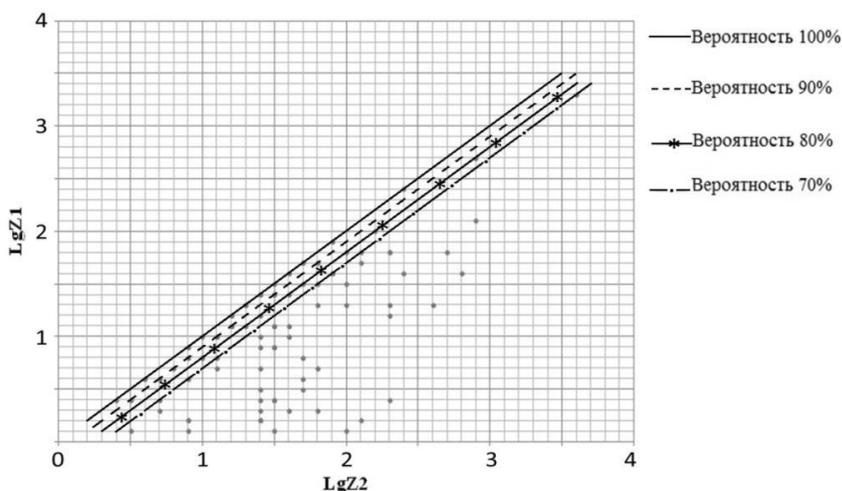


Рис. 3. Зависимость радиолокационной отражаемости под облаком ( $\lg Z1$ ) от радиолокационной отражаемости на уровне нулевой изотермы ( $\lg Z2$ ) в радиусе 90 км от радиолокатора с различной накопленной вероятностью.

Использование связи между радиолокационной отражаемостью под облаком ( $Z1$ ) и интенсивностью выпадающих осадков (формула 1)

позволяет получать интенсивность осадков по значению радиолокационной отражаемости на уровне нулевой изотермы ( $Z_2$ ) для облаков в стадии роста и зрелости. Полученная зависимость может быть использована для оценки параметров осадков вне 90-км зоны. При этом с учетом направления перемещения облаков возможно получение информации об осадках в расширенной зоне действия локатора.

Уточнение информации об интенсивности выпадающих осадков возможно с учетом данных об особенностях исследуемых облаков. Для этого в рассмотрение вводится параметр — толщина переохлажденной зоны  $\Delta H_-$  ( $\Delta H_- = H_{в.г.} - H_0^{\circ C}$ ). Для каждого случая выпадения осадков были использованы значения  $lgZ_1$  в зависимости от  $lgZ_2$  и  $\Delta H_-$ , проведены изолинии  $lgZ_1$  и по формуле (1) рассчитаны соответствующие им значения интенсивности осадков.

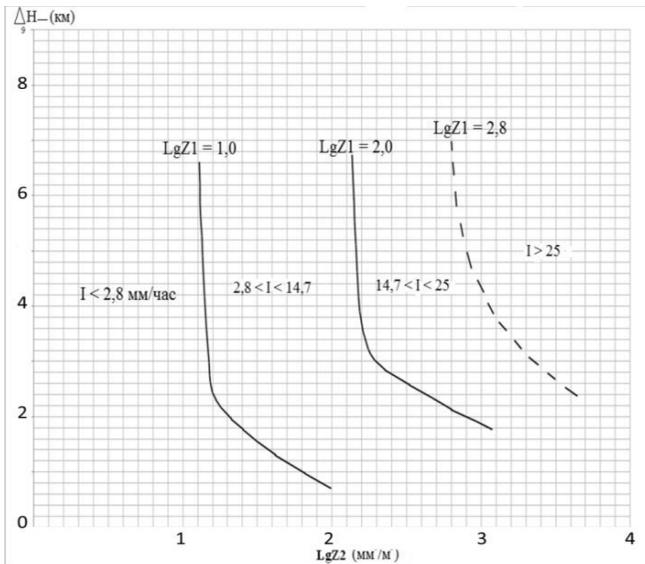


Рис. 4. Зоны осадков различной интенсивности в зависимости от радиолокационной отражаемости на уровне нулевой изотермы ( $lgZ_2$ ) и толщины переохлажденной части облака ( $\Delta H_-$ ).

На рис. 4 представлены зоны различной интенсивности осадков в зависимости от радиолокационной отражаемости на уровне нулевой изотермы ( $\lg Z_2$ ) и толщины переохлажденной части облака ( $\Delta H_{\text{п}}$ ). Как следует из рис. 4, если толщина переохлажденной части менее 2,5—3 км, интенсивность осадков зависит от  $\lg Z_2$  и от  $\Delta H_{\text{п}}$ .

Предложенный алгоритм позволяет осуществлять оценку интенсивности осадков из конвективных облаков по радиолокационным данным об облаках на расстоянии 90—180 км от радиолокатора, используя графики, представленные на рис. 3 и рис. 4.

Отметим, что в работе анализировались радиолокационные данные измерений в Северо-Западном регионе. В других регионах, используя предложенный подход, вероятно, потребуются провести уточнение на местном материале.

### **Обсуждение и заключение**

Контроль параметров осадков радиолокационным методом — актуальная и сложная задача, которая решается только при использовании ряда допущений. Одна из проблем существующего метода — недостаточный радиус радиолокационного обзора из-за кривизны Земли.

В настоящей работе предложен возможный вариант решения — оценка осадков по значениям радиолокационных параметров облака выше уровня конденсации. Задача контроля осадков радиолокатором решается путем выявления физико-статистических связей радиолокационных параметров под облаком и внутри его. Для этого по радиолокационным данным об облаках, находящихся в стадии роста и зрелости, была установлена статистическая связь между отражаемостью под облаком и отражаемостью от облака на уровне нулевой изотермы. Далее была определена зависимость интенсивности осадков от отражаемости на уровне нулевой изотермы. Для уточнения получаемых оценок введен дополнительный критерий — толщина переохлажденной зоны облака.

Предложенный подход интересен тем, что позволяет расширить радиус обнаружения и оценки интенсивности осадков по радиолокационным данным, ограниченного кривизной земной поверхности.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, грант 17-05-00965\_а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Абшаев А. М., Абшаев М. Т.* (2013). Программа обработки информации различных МРЛ / В сб.: Труды XXVIII Всерос. симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». — СПб. Т1. С. 214—222.

*Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Малкарова А. М., Мизиева Ж. Ю.* (2009). Радиолокационные исследования водосодержания кучево-дождевых облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 45. № 6. С. 1—7.

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

*Вуколов Э. В.* (2004). Основы статистического анализа — М.: ФОРУМ – ИНФРА-М. 463 с.

*Мазин И. П., Шметер С. М.* (1983). Облака. Строение и физика образования — Л.: Гидрометеиздат. 279 с.

*Матвеев Л. Т.* (2000). Физика атмосферы — СПб: Гидрометеиздат. 778 с.

Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 (1993) — СПб: Гидрометеиздат. 334 с.

*Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Богданов Е. В., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М.* (2016). Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов // Метеорология и гидрология. № 9. С. 27—40.

*Heymfield G. M.* (2000). Precipitation radar reflectivity profiles as compared with high-resolution airborne and ground based radar measurements // J. Appl. Meteor. V. 39. № 12. P. 2080—2102.

УДК 551.506.5

**ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ И ПОЛЯРНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУХА  
ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА СТАНЦИИ ВОСТОК**

*Л. Г. Соколенко, П. Л. Стерхов*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
e-mail: sokolenko\_lg@mail.ru  
e-mail: plsterkhov@rambler.ru

Поступила в редакцию 24.10.2017  
Поступила после доработки 19.12.2017

Наблюдения атмосферно-электрических характеристик в Антарктиде, как наиболее удаленном регионе, позволяют получать информацию в условиях, близких к фоновому состоянию геофизических параметров атмосферы. Особенности географического расположения и подстилающей поверхности сказываются на формировании значений измеряемых величин. Континентальный рельеф Антарктиды скрыт под высоким стабильным ледниковым покровом, его открытая часть и отдельные выходы горных пород по площади составляют доли процента от общей площади континента. В соответствии с международным правовым статусом Антарктида является безъядерной зоной, что исключает применение на ее территории атомных энергоблоков с начала 1980-х годов. Согласно конвенции об Антарктиде континент не имеет политической принадлежности и не используется для промышленной добычи и переработки минерального сырья. В связи с этим полученные в Антарктиде данные даже непродолжительных измерений, а именно на станции Восток, расположенной на высоте в 3488 м над уровнем моря, являются уникальными.

Основными атмосферно-электрическими характеристиками являются вертикальная компонента напряженности электрического поля атмосферы ( $E_{zn}$ ) и удельные полярные электрические проводимости воздуха ( $\lambda_{+n}$  и  $\lambda_{-n}$ ). Данные синхронных наблюдений за ними позволяют получить целостное представление о локальном электрическом состоянии атмосферы.

Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) осуществляющей научно-методическое руководство сетью атмосферно-электрических пунктов наблюдений, принадлежит ведущая роль в разработке приборов для измерения характеристик атмосферного электричества в атмосфере, в частности измерителей «Поле» и «Электропроводность» различных модификаций.

Наиболее полные наблюдения за атмосферно-электрическими характеристиками в Антарктиде проводились на станции «Мирный» в период с 1981 по 1990 гг. Организация и оборудование стационарного пункта наблюдений атмосферного электричества в обсерватории Мирный обеспечили непрерывное получение атмосферно-электрических параметров за нескольких годовых циклов.

На станции Восток вследствие особенностей ее расположения и режима работы (вахтовые смены) организовать регулярные атмосферно-электрические измерения долгое время не удавалось (наблюдения проводились эпизодически).

Продолжительные синхронные измерения вертикальной компоненты электрического поля атмосферы и удельных полярных электрических проводимостей воздуха на станции Восток впервые были выполнены только в 1989 г. в зимовочном составе 34-й Советской антарктической экспедиции (САЭ-34). Измерения атмосферно-электрических характеристик на станции Восток производились разработанными в ГГО приборами «Поле-2» и «Электропроводность-2», занесенными в Госреестр средств измерений (Соколенко, Шварц, 1990; Гордюк, 1981).

Источники ионизации атмосферы условно можно разделить на две группы:

— источники, обусловленные радиоактивностью почвы и атмосферы,

— источники, обусловленные космическим излучением.

Следует полагать, что на станции Восток, подстилающая поверхность на которой представляет собой снежно-ледовый покров, доля ионизации атмосферы за счет космического излучения будет преобладающей.

На станции Восток датчики приборов атмосферного электричества были установлены в непосредственной близости от метеорологической площадки. Датчик измерителя «Поле-2» на станции Восток располагался на расстоянии 50 м от служебно-жилого модуля на стандартной металлической платформе размером в вертикальной проекции  $3 \times 3$  м и высотой 1,7 м. Датчик измерителя «Электропроводность-2» устанавливался на открытой площадке на расстоянии 20 м от ближайшего здания на специальной металлической опоре. При этом заборные отверстия блока аспирационных конденсаторов располагались на высоте 1,8 м над подстилающей поверхностью.

Обобщенные результаты измерений атмосферно-электрических характеристик атмосферы на станции Восток для условий хорошей погоды (отсутствие атмосферных явлений, облачности нижнего яруса и ветра более  $5 \text{ мс}^{-1}$ ) в период с мая 1989 по февраль 1990 года представлены на рис. 1, на котором:

$E_{zn}$  — инвертированное значение вертикальной компоненты напряженности электрического поля атмосферы для условий хорошей погоды на высоте 1,7 м без учета редуцированного множителя (индекс «п» обозначает условия хорошей погоды, иначе — нормальные значения);

$\lambda_{+n}$  и  $\lambda_{-n}$  — положительная и отрицательная электрические проводимости воздуха на высоте 1,8 м от подстилающей поверхности;

$J_n$  — расчетное значение плотности вертикального тока в атмосфере без учета редуцированного множителя.

Знак вертикальной компоненты электрического поля атмосферы для упрощения восприятия на графике соответствует знаку градиента электрического потенциала. Среднемесячные значения получены по фактическому количеству наблюдений. В целом из-за погодных

условий количество наблюдений в летние месяцы, как правило, выше чем в зимние.

В общем для вертикальной компоненты напряженности электрического поля атмосферы в условиях хорошей погоды характерно наличие минимума напряженности в летнее время и максимума в зимнее. На станции Восток  $E_{zn}$  в ноябре, декабре, январе (лето для южного полушария) зафиксированы близкие по величине низкие значения и более высокие значения в остальные месяцы. Имеет место явная несимметричность увеличения напряженности электрического поля атмосферы в феврале относительно дня летнего солнцестояния Южного полушария.

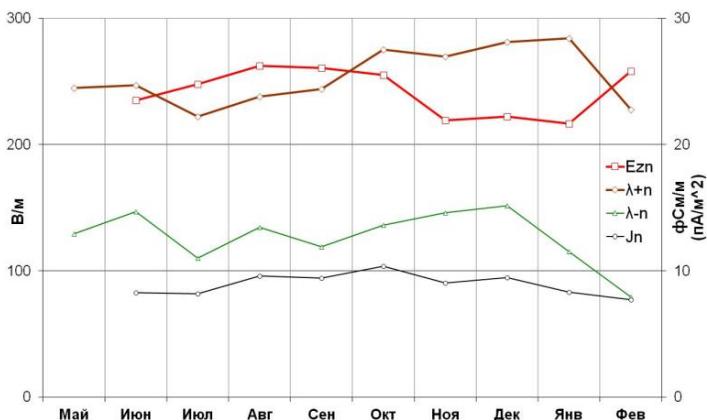


Рис. 1. Годовой ход атмосферно-электрических характеристик атмосферы на станции Восток для условий хорошей погоды:

$E_{zn}$ , В/м — вертикальная компонента напряженности электрического поля атмосферы;

$\lambda_{+n}$  и  $\lambda_{-n}$ , фСм/м — удельные полярные электрические проводимости воздуха;

$J_n$ , пА/м<sup>2</sup> — плотность вертикального тока в атмосфере.

Среднемесячные значения напряженности электрического поля атмосферы колеблются от 258—262 Вм<sup>-1</sup> в августе и феврале до 217—222 Вм<sup>-1</sup> в ноябре—январе.

Аналогичный сезонный ход  $E_{zn}$  с максимумом в августе и минимумом в декабре—январе был получен ранее на базовой станции Мирный (Гордюк, 1984). Несимметричность значений параметров атмосферного электричества относительно дня летнего солнцестояния Южного полушария явно выражена в ходе удельной положительной электрической проводимости воздуха: наблюдается широкий размытый максимум с октября по январь и заметное уменьшение ее в феврале месяце. Среднемесячное значение удельной положительной электрической проводимости воздуха в феврале составляет 22,8 фСм<sup>-1</sup>, а абсолютный минимум в июле — 22,2 фСм<sup>-1</sup>. Удельная отрицательная электрическая проводимость воздуха имеет абсолютный минимум в феврале.

Амплитуда годового хода плотности вертикального тока невелика, при этом достаточно выраженный максимум приходится на октябрь.

Для сравнения на рис. 2 представлен график среднемесячных значений вертикальной компоненты напряженности электрического поля атмосферы (инвертированное значение на высоте измерительной платформы 1,0 м с учетом редуцированного множителя), удельных полярных электрических проводимостей воздуха и суммарной электрической проводимости воздуха на высоте 2,0 м на станции Воейково для условий хорошей погоды за период 1989—1996 гг. Значения атмосферно-электрических характеристик рассчитаны по данным режимно-справочного банка данных «Атмосферное электричество» (Попов, Соколенко, 2012). Атмосферно-электрические характеристики отдельно за 1989 г. по станции Воейково не приводятся, т. к. наблюдения удельных полярных проводимостей воздуха в Воейково не проводились в течение трех месяцев.

Минимальное значение вертикальной компоненты напряженности электрического поля атмосферы приходится на июнь (месяц летнего солнцестояния для Северного полушария). Относительно месяца летнего солнцестояния и минимального среднемесячного значения напряженности электрического поля атмосферы максимум

напряженности поля несимметрично приходится на февраль. Наблюдаемое максимально значение напряженности электрического поля атмосферы в феврале месяце достаточно очевидно обусловлено минимальными в этот месяц значениями удельных полярных электрических проводимостей воздуха.

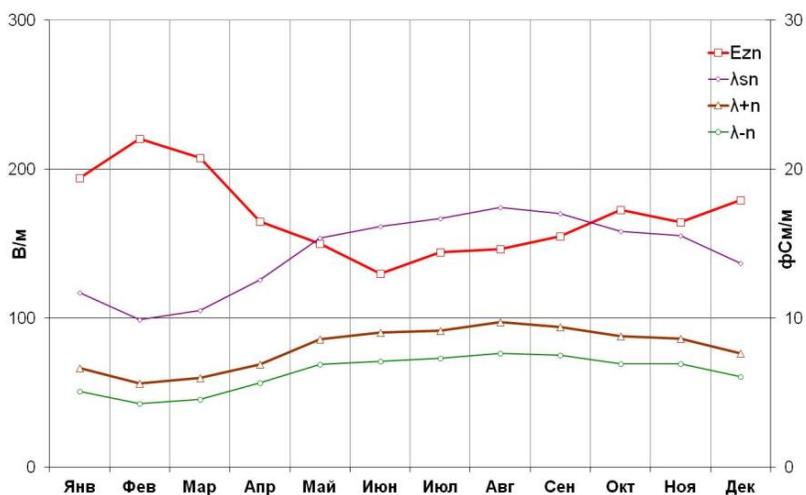


Рис. 2. Среднемесячные значения вертикальной компоненты напряженности электрического поля атмосферы ( $E_{zn}$ ), удельных положительной, отрицательной и суммарной проводимости воздуха ( $\lambda_{+n}$ ,  $\lambda_{-n}$  и  $\lambda_{sn} = \lambda_{+n} + \lambda_{-n}$  соответственно) на станции Воейково за 1991—1996 гг.

Минимальные значения годовых вариаций вертикальной компоненты электрического поля атмосферы на станции Восток и в Воейково в обоих случаях в общих чертах соответствуют месяцам летнего солнцестояния. При этом максимум напряженности электрического поля атмосферы в феврале месяце выражен как на станции Восток, так и в Воейково.

Для годовой вариации удельных полярных электрических проводимостей воздуха на станциях Восток и Воейково характерны

низкие значения в феврале и максимальные значения в летнее время с учетом разных полушарий. С учетом синхронности этих изменений и существенного различия геофизических условий этих двух пунктов наблюдений с большой долей вероятности можно предположить, что причина годового хода удельных полярных электрических проводимостей воздуха в большей степени связана с космическим излучением и носит глобальный характер.

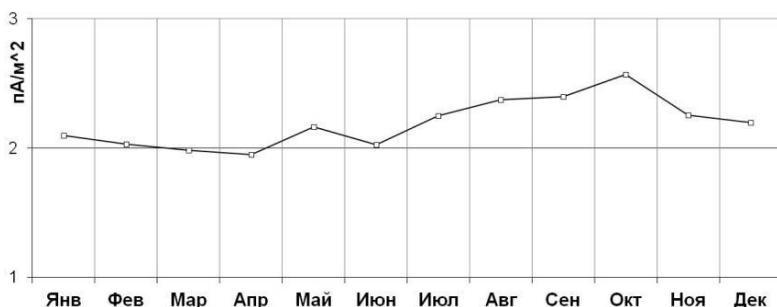


Рис. 3. Расчетные среднемесячные значения плотности вертикального тока в атмосфере с учетом редуционного множителя для условий хорошей погоды. Станция Воейково. Период 1989—1996 гг.

На рис. 3 представлен график среднемесячных расчетных значений плотности вертикального тока в атмосфере ( $J_n$ ) для условий хорошей погоды для станции Воейково за период с 1989 по 1996 гг. с учетом редуционного множителя. Годовой ход плотности вертикального тока в атмосфере на станции Воейково имеет минимум в апреле и максимум в октябре. Максимум  $J_n$  по данным многолетних наблюдений на станции Воейково коррелирует с максимумом плотности вертикального тока в атмосфере на станции Восток по данным наблюдений за 1989 г. (рис. 1).

Приведенное сравнение годовых циклов основных атмосферно-электрических характеристик на станции Восток за период с мая 1989 г. по февраль 1990 г. и по данным многолетних измерений в

пункте наблюдения Воейково для условий хорошей погоды указывает на их взаимосвязь.

В годовом ходе вертикальной компоненты электрического поля атмосферы выделяется летний минимум, приходящийся в Северном полушарии на июнь, а в Южном на ноябрь, декабрь и январь. Кроме того, имеется общий глобальный максимум, приходящийся на февраль—март как в Южном, так и в Северном полушариях. Годовая вариация плотности вертикального тока в атмосфере имеет вид простой симметричной волны с небольшой амплитудой (минимум наблюдается в апреле, слабо выраженные максимум — в октябре для обеих станций). Годовой цикл удельных полярных электрических проводимостей воздуха имеет общее свойство низких значений в феврале — марте и более высоких значений в остальное время года.

Необходимо отметить, что на станции Восток удельная электрическая проводимость воздуха для условий хорошей погоды более чем в 2 раза выше, чем на станции Воейково, что может быть связано с превышенной концентрацией мельчайших аэрозольных частиц в Воейково по сравнению с Антарктическим регионом, где антропогенная составляющая минимальна (Соколенко, Шварц, 2004). Значения вертикальной компоненты напряженности электрического поля в атмосфере для условий хорошей погоды на станции Восток по отношению к пункту наблюдений в Воейково приблизительно в 1,5 раза выше, что может быть связано с различиями в высоте установки датчиков над подстилающей поверхностью.

Годовые вариации основных атмосферно-электрических характеристик для условий хорошей погоды идентичны как для многолетнего ряда измерений на станции Воейково, так и для непродолжительного ряда измерений на станции Восток, что позволяет говорить о глобальном характере вариаций атмосферно-электрических характеристик. Для условий хорошей погоды метеорологические факторы решающего влияния на годовые циклы атмосферно-электрических величин не оказывают.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Гордюк В. П.* (1981) Исследования принципов построения приборов для измерения напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы // Труды ГГО. Вып. 442. С. 96—102.

*Гордюк В. П.* (1984) Электрические характеристики атмосферы в обсерватории Мирный по данным измерений в 26-й САЭ / Атмосферное электричество. Труды II Всесоюзного симпозиума. — Л.: Гидрометеоиздат. С. 59—62.

*Попов И. Б., Соколенко Л. Г.* (2012) РСБД «Атмосферное электричество» Свидетельство о госрегистрации базы данных № 2013620672 от 04.06.2013 г.

*Соколенко Л. Г., Шварц Я. М.* (1990) Датчик электрической проводимости воздуха // Труды ГГО. Вып. 527. С. 33—35.

*Шварц Я. М., Соколенко Л. Г.* (2004) Мониторинг электрического состояния приземного слоя атмосферы на территории России // Труды НИЦ ДЗА (филиала ГГО), Вып. 5 (553). С. 169—175.

**КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА СУММАРНОЙ  
СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РЕГИОНА  
НА ПРИМЕРЕ ЯКУТИИ**

*О. В. Трофимова, В. А. Задворных*

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

Поступила в редакцию 3.11.2017  
Поступила после доработки 20.12.2017

Неисчерпаемость солнечной энергии, количество которой во много раз превосходит прогнозируемые потребности человечества в энергии, а также экологическая чистота ставят использование солнечной энергии в будущем на одно из первых мест в ряду возобновляемых источников.

Положительный опыт использования солнечной энергии накоплен в Якутии (<http://gisre.ru/maps/maps-obj/ses>).

Республика Саха (Якутия), как показывают выполненные ранее исследования по оценке солнечного потенциала территории России, обладает достаточными ресурсами солнечной радиации для обеспечения энергией ее отдаленных и труднодоступных районов (<http://www.eastrenewable.ru/media/presentations/2017/>).

Годовые суммы суммарной солнечной радиации при ясном небе (возможные суммы) на территории Якутии увеличиваются от 4500 МДж/м<sup>2</sup> на севере до 6100 МДж/м<sup>2</sup> на юге. Продолжительность солнечного сияния (годовая) изменяется с северо-запада на юго-восток от 1200 до 2200 часов (рис. 1).

Для технико-экономического обоснования использования солнечной энергии в любом регионе необходима количественная

оценка приходящей солнечной радиации при реальных условиях облачности. Поскольку на территории Якутии, площадь которой превышает 3 млн км<sup>2</sup>, сеть актинометрических станций весьма редкая, то для расчетов режима работы солнечных установок возникает необходимость либо применения косвенных методов определения солнечной радиации, либо обращения к открытым и доступным базам данных, например NASA SSE (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>).

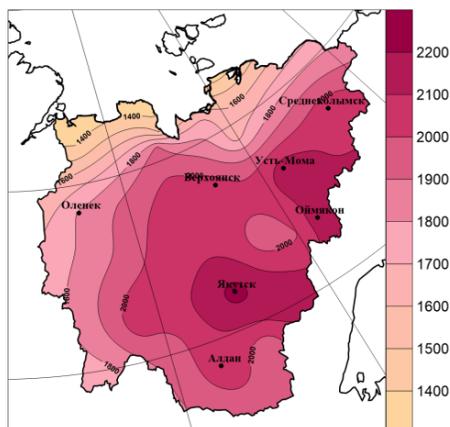


Рис. 1. Продолжительность солнечного сияния за год, часы.

Целью данной работы является сравнение результатов расчета суммарной солнечной радиации различными косвенными методами с данными наблюдений.

Для расчета суммарной солнечной радиации широко используются физически обоснованные функциональные зависимости ее от продолжительности солнечного сияния и облачности (Аверкиев, 1962; Берлянд, 1961; Даффи, Бекман, 2013; Кондратьев, 1969; Сивков, 1968; Reitveld, 1978). Использование этих зависимостей всегда связано с необходимостью уточнения эмпирических коэффициентов, входящих в формулы для расчета.

В данной работе выполнено сравнение измеренных сумм суммарной солнечной радиации с результатами расчетов по формулам, предложенным А. Онгстремом, Т. Г. Берлянд и И. В. Слесаренко.

**Формула А. Онгстрема** устанавливает связь суммарной радиации с продолжительностью солнечного сияния (Сивков, 1968):

$$Q = Q_0 \left( a + b \frac{SS}{SS_0} \right), \quad (1)$$

где  $Q_0$  — средняя суточная (для рассматриваемого месяца) или месячная сумма суммарной радиации, поступающей на земную поверхность при безоблачном небе;

$SS_0$  — астрономически возможная продолжительность солнечного сияния;

$Q$  — средняя суточная (для рассматриваемого месяца) или месячная сумма при реальных условиях облачности;

$SS$  — фактическая продолжительность солнечного сияния (по гелиографу).

Коэффициент « $a$ » определяется отношением между  $Q$  при небе, полностью закрытом облаками, и  $Q_0$  при безоблачном небе. Он характеризует долю пропущенной облаками суммарной радиации при сплошной облачности, коэффициент « $b$ » — долю задержанной облаками радиации. Сумма коэффициентов « $a$ » и « $b$ » близка к единице. В расчетах обычно принимают  $b = 1 - a$ .

**Формула Т. Г. Берлянд** устанавливает связь суммарной радиации с количеством общей облачности (Берлянд, 1961):

$$Q = Q_0 \left[ 1 - (a + b n_{общ}) \cdot n_{общ} \right], \quad (2)$$

где  $n_{общ}$  — количество общей облачности в долях единицы,

$a$  и  $b$  — эмпирические коэффициенты.

На основании анализа данных 75 пунктов, расположенных в различных климатических зонах, Т. Г. Берлянд показала, что параметр  $b$  можно считать постоянным и принять его равным 0,38. Параметр  $a$  зависит от широты и физико-географических условий района.

**Формула И. В. Слесаренко**, предложенная им для территории Дальневосточного ФО, учитывает связи суммарной радиации с продолжительностью солнечного сияния и облачностью (Слесаренко, 2015):

$$Q = Q_{заатм} \cdot \left( 0,33 \cdot \frac{n_{общ}}{n_{общ} + n_{нижн}} + 0,57 \cdot \frac{SS}{SS_0} \right), \quad (3)$$

где  $Q_{заатм}$  – суммарная радиация, приходящая на верхнюю границу атмосферы,  $n_{нижн}$  – количество нижней облачности в долях единицы.

В настоящей работе в качестве исходной информации использованы данные срочных наблюдений шести актинометрических станций, данные регистрации суммарной радиации трех станций, а также данные продолжительности солнечного сияния 33-х метеорологических станций и облачности 124-х станций. На основе данных наблюдений были уточнены эмпирические коэффициенты в формулах (1) и (2) для всех месяцев года, значения которых осреднены по широтам в интервале 56—70° с. ш. (приведены в таблицах 1 и 2).

Анализ годового хода сумм суммарной солнечной радиации, полученных по формулам (1)—(3) и по данным наблюдений (рис. 2), показывает, что вид кривой годового хода одинаков, а наибольшие различия, отмечающиеся в летние месяцы в условиях большого прихода солнечной радиации, не превышают 10—12 % (по формуле (3) до 20 %). Различия в годовых суммах суммарной радиации между расчетными значениями и наблюдаемыми также невелики и составляют 1—11 %.

Распределение годовых сумм суммарной радиации по территории Якутии иллюстрирует рис. 3, из которого видно, что независимо от способа расчета сохраняется общий характер поля распределения

годовых сумм суммарной радиации — рост в направлении с северо-запада на юго-восток.

Из представленных карт видно, что поле суммарной радиации по данным наблюдений (рис. 3 з) в связи с очень редкой актинометрической сетью очень схематично и не отражает в полной мере особенностей распределения суммарной радиации по территории Якутии. Заметную детализацию изолиний на карте, построенной по формуле (2), можно объяснить большим количеством расчетных точек — 124 (по числу станций с наблюдениями за облачностью). Однако использование этой формулы для территории Якутии связано с большей погрешностью расчетов по сравнению с формулой (1), т. е. с расчетами по продолжительности солнечного сияния. Это подтверждается данными табл. 3.

В этой таблице приводятся разности между месячными и годовыми суммами суммарной радиации, рассчитанными по формулам (1), (2) и (3), и суммами, рассчитанными по срочным наблюдениям методом «трапеций», осредненными за период с начала работы станций по 2016 г.

Следует отметить, что рассмотренный нами метод И. В. Слесаренко (3) дает существенное занижение сумм суммарной радиации в северной половине территории Якутии (рис. 3 в).

В настоящее время многими исследователями рассматривается возможность использования спутниковой информации (Попель и др., 2010; NASA SSE: Methodology. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s07#s07>; Pinker, Laszlo, 1992). В данной работе рассмотрены данные, полученные с помощью спутников, и сделано их сравнение с результатами наблюдений. В базе данных NASA SSE (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>) представлены среднеемесячные дневные суммы суммарной радиации за период 1983—2005 гг. для всего Земного шара в узлах сетки с шагом  $1 \times 1^\circ$ . На рис. 4 приведено распределение годовых сумм суммарной радиации по данным NASA SSE для узлов сетки на территории Якутии, из которого видно, что общая закономерность распределения радиации на территории региона соответствует как данным наблюдений, так и рассмотренным расчетным данным.

Таблица 1

Коэффициент  $a$  в формуле А. Онгстрема, уточненный для Якутии

$\varphi, ^\circ \text{ с. ш.}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
56	0,59	0,56	0,59	0,50	0,40	0,39	0,38	0,38	0,36	0,43	0,53	0,64
58	0,59	0,55	0,60	0,52	0,42	0,39	0,38	0,38	0,36	0,45	0,53	0,67
60	0,59	0,53	0,61	0,55	0,44	0,39	0,38	0,38	0,36	0,46	0,52	0,72
62	0,58	0,51	0,62	0,57	0,46	0,39	0,38	0,38	0,36	0,48	0,50	0,77
64	0,58	0,49	0,62	0,60	0,48	0,39	0,38	0,38	0,35	0,50	0,48	0,83
66	0,57	0,47	0,62	0,62	0,51	0,40	0,37	0,37	0,35	0,53	0,46	0,89
68	0,57	0,45	0,62	0,65	0,53	0,40	0,37	0,37	0,35	0,55	0,42	0,97
70	0,56	0,43	0,61	0,67	0,56	0,40	0,37	0,36	0,35	0,58	0,39	0,97

Таблица 2

Коэффициент  $a$  в формуле Т. Г. Берлянд, уточненный для Якутии

$\varphi, ^\circ \text{ с. ш.}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
56	0,18	0,11	0,06	0,14	0,18	0,24	0,26	0,30	0,32	0,28	0,06	0,09
58	0,20	0,14	0,05	0,11	0,16	0,20	0,23	0,25	0,29	0,25	0,13	0,14
60	0,24	0,18	0,05	0,07	0,15	0,16	0,19	0,22	0,26	0,23	0,19	0,21
62	0,30	0,23	0,05	0,03	0,12	0,13	0,16	0,18	0,24	0,20	0,27	0,30
64	0,34	0,30	0,06	0,01	0,10	0,12	0,15	0,16	0,23	0,18	0,37	0,40
66	0,42	0,38	0,08	0,01	0,08	0,14	0,16	0,17	0,23	0,16	0,46	0,50
68	0,53	0,47	0,10	0,01	0,07	0,18	0,20	0,20	0,25	0,15	0,56	0,74
70	0,64	0,58	0,14	0,02	0,06	0,26	0,25	0,24	0,29	0,14	0,66	0,88

Таблица 3

Разности между значениями суммарной радиации, рассчитанными по формулам (1), (2) и (3), и по данным срочных наблюдений, МДж/м<sup>2</sup>

№ формулы	Месяц												Год	Δ, %
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
<i>Оленок</i>														
1	2	7	6	14	-3	-56	-71	-5	10	4	3	0	-70	-2
2	-2	-17	-37	-32	-29	12	-25	-15	-1	-15	-6	0	-148	-5
3	-1	1	-3	-14	-102	-44	-27	23	-10	-12	-5	0	-176	-9
<i>Верхоянск</i>														
1	5	5	8	7	13	-21	-38	16	0	8	5	0	8	0
2	4	12	22	39	65	64	70	46	22	12	6	0	364	11
3	-2	4	5	-9	-56	-68	-47	2	-19	-12	-3	0	-203	-4
<i>Среднеколымск</i>														
1	4	5	4	2	-10	-25	-50	6	-7	10	5	0	-44	-1
2	2	-2	-19	-51	-70	-41	-21	-13	-8	4	0	0	-204	-6
3	-2	-3	-13	-22	-70	-50	-39	8	-7	-11	-4	0	-199	-5
<i>Усть-Мома</i>														
1	4	7	10	5	2	-35	-3	2	2	18	4	-1	15	0
2	3	-3	-10	-15	-45	-54	-16	-30	-21	1	1	0	-187	-5
3	-2	7	8	-1	-64	-96	-47	0	-17	1	-3	-1	-214	-4
<i>Алдан</i>														
1	8	12	8	14	26	5	15	10	9	8	12	7	146	4
2	-7	-17	-16	-17	-3	6	15	6	-3	-9	-6	-3	-42	-1
3	5	8	-21	-44	-28	3	38	30	-5	-24	-5	2	-27	-1

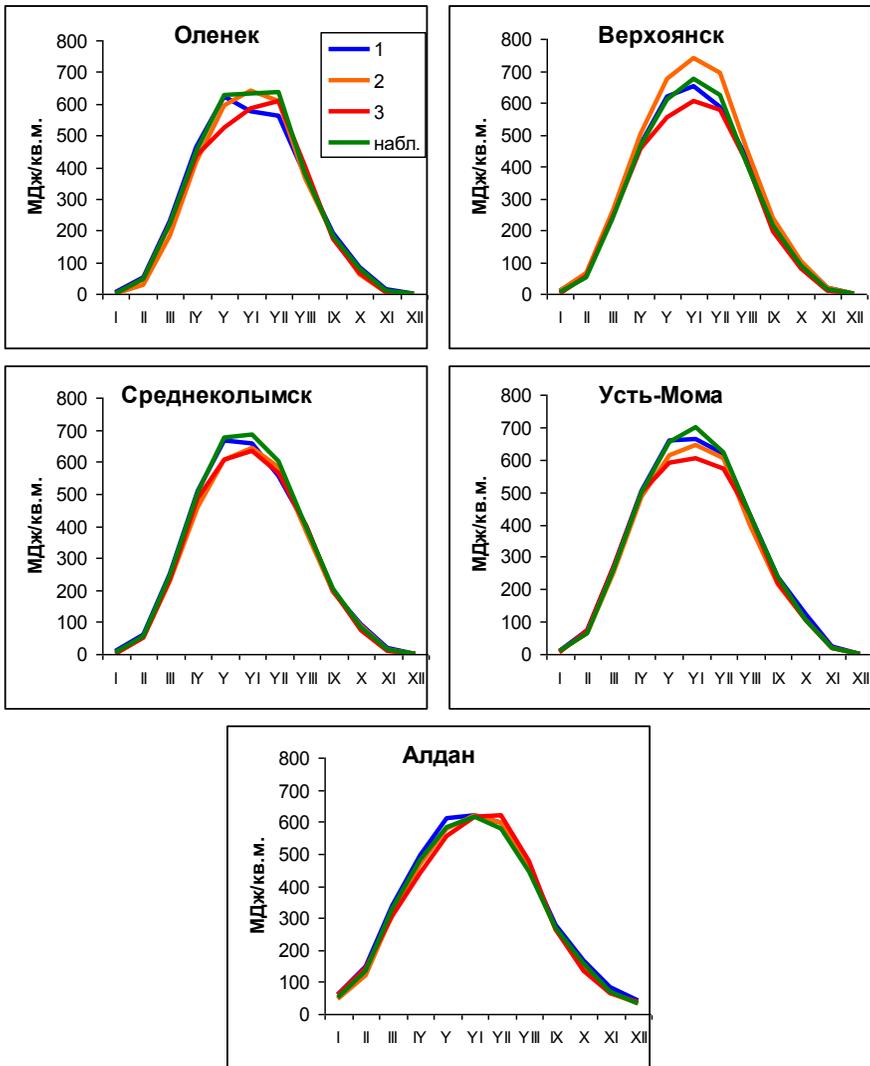


Рис. 2. Годовой ход суммарной солнечной радиации, рассчитанной по формулам (1), (2) и (3), и по данным срочных наблюдений на актинометрических станциях.

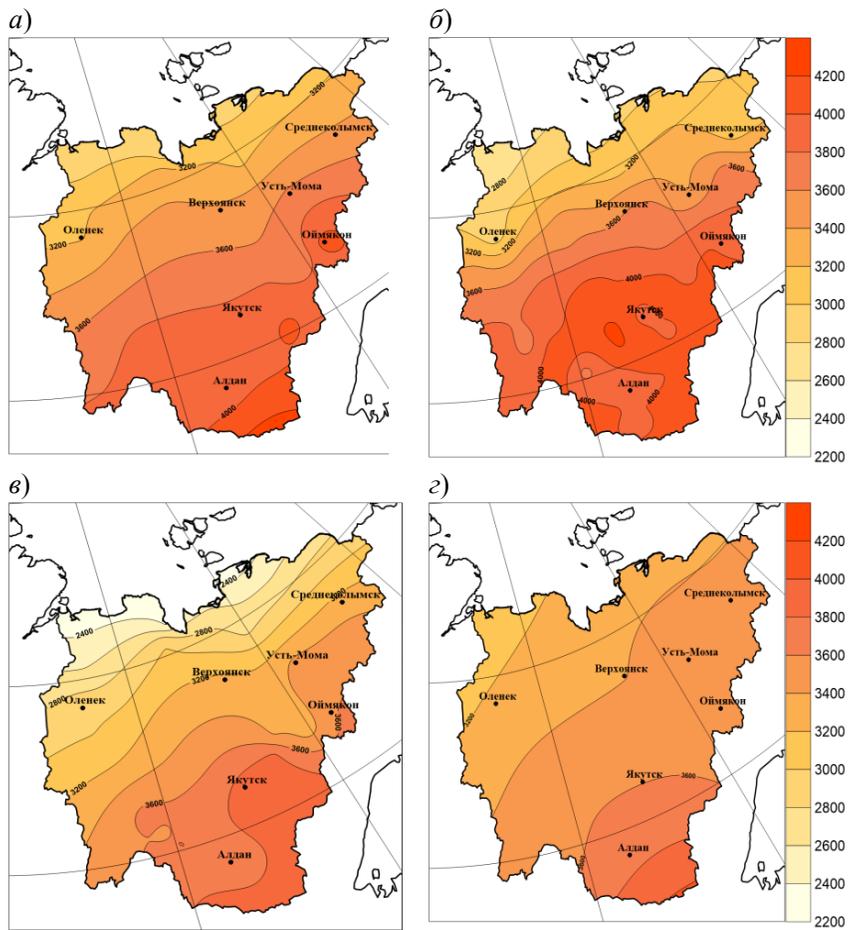


Рис. 3. Распределение годовых сумм суммарной радиации, рассчитанных по методу А. Онгстрема (а), Т. Г. Берлянд (б), И. В. Слесаренко (в), и по данным срочных наблюдений (г).

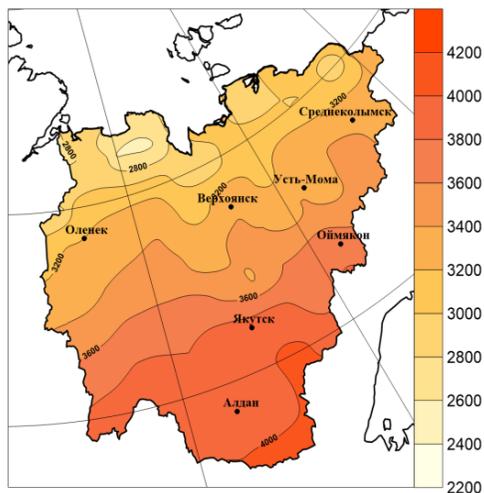


Рис. 4. Годовые суммы суммарной радиации ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ) по данным NASA SSE за период 1983—2005 гг.

В табл. 4 приведены разности между суммами суммарной радиации, полученными на основе спутниковой информации, и соответствующими суммами, измеренными на станциях по программе «регистрация» за период 1983—2005 гг. Наибольшие различия в дневных суммах отмечаются в зимние месяцы, когда поступающая к земной поверхности радиация мала. В летние месяцы ошибки невелики. Следует отметить, что в зимние месяцы спутниковые данные занижают значения суммарной радиации, на что указывает отрицательный знак разностей между месячными суммами. Различия в годовых суммах суммарной радиации незначительны.

В результате выполненной работы можно сделать вывод, что для косвенных расчетов суммарной солнечной радиации на территории Якутии наилучшим образом подходит использование данных продолжительности солнечного сияния (формула А. Онгстрема с уточненными для данной территории коэффициентами).

Таблица 4

**Расхождения (%) между среднемесячными дневными суммами суммарной радиации за период 01.07.1983—30.06.2005 гг. по данным NASA SSE и полученными по данным непрерывной регистрации**

Станция	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Верхоянск	-35	-8	-7	-9	2	3	4	7	13	2	-16		1
Оймякон	-26	-19	-4	-12	-1	-1	1	3	0	-1	-16	-40	-4
Якутск	-2	2	-6	-5	2	2	1	-3	2	4	-15	-27	-1

Проведенный сравнительный анализ спутниковой информации с данными наблюдений показал, что ее использование для региональной оценки прихода солнечной радиации представляется преждевременным. В условиях продолжающегося сокращения наблюдательной сети в Российской Федерации требуется расширение этих работ с привлечением большего количества информации, как по времени, так и по охвату территории.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Аверкиев М. С.* (1962). Об универсальной формуле для расчета суммарной радиации // *Метеорология и гидрология*. № 2. С. 27—30.

*Берлянд Т. Г.* (1961). Распределение солнечной радиации на континентах. — Л.: Гидрометеиздат. 227 с.

*Даффи Дж., Бекман У.* (2013). Основы солнечной теплоэнергетики. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект». 885 с.

*Кондратьев К. Я.* (1969). Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности. — Л.: Гидрометеиздат. 564 с.

*Попель О. С., Фрид С. Е., Коломиец Ю. Г., Киселева С. В., Терехова Е. Н.* (2010). Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. — М.: Объединенный институт высоких температур РАН. 54 с.

*Сивков С. И.* (1968). Методы расчета характеристик солнечной радиации. — Л.: Гидрометеиздат. 223 с.

*Слесаренко И. В.* (2015). Совершенствование систем теплоснабжения с солнечными водонагревательными установками (на примере Дальневосточного региона): дисс. канд. техн. наук: 05.23.03. — Владивосток: ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 196 с.

NASA Surface meteorology and Solar Energy: Methodology.  
<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s07#s07>

*Pinker R. T., Laszlo I.* (1992). Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Application on a Global Scale // *Journal of Applied Meteorology*. V. 31. P. 194—211.

*Rietveld M. R.* (1978). A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine // *Agricultural Meteorology*. V. 19. P. 243—252.

*The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set* (2009).  
<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

<http://gisre.ru/maps/maps-obj/ses>).

<http://www.eastrenewable.ru/media/presentations/2017/>.

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ В ПРИМОРЬЕ ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

*И. Н. Плахина<sup>1</sup>, Н. В. Панкратова<sup>1</sup>, Е. Л. Махоткина<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН  
119017 Москва, Пыжевский пер, д. 3

<sup>2</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7  
E-mail: *inna@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 20.03.2017  
Поступила после доработки 15.07.2017

### **Введение и постановка задачи исследования**

Аэрозольная оптическая толщина атмосферы (АОТ) является важным, но наименее определенным параметром при оценке изменений, происходящих в климатической системе (ОД\_РФ-1, 2008; ОД\_РФ-2, 2014; IPCC, 2007; IPCC, 2013). В последние годы появились публикации в которых по данным спутниковых (MODIS) и наземных наблюдений (AERONET) за период порядка 10 лет рассматриваются пространственно-временные изменения АОТ в различных регионах России (Поддубный и др., 2013; Сакерин и др. 2011а, б; 2012а, б, в). В этих работах особое внимание уделено исследованию характеристик атмосферного аэрозоля в так называемой переходной зоне «материк-океан», которое выполнено на примере дальневосточного региона РФ (Сакерин и др., 2011а, б). Для этого района характерны высокое содержание аэрозоля и его многообразие по источникам происхождения.

По «собственным» источникам генерации аэрозоля регион подвержен сравнительно небольшим антропогенным воздействиям,

однако развитая муссонно-бризовая циркуляция и соседство с областями, различающимися типами подстилающей поверхности и антропогенной нагрузкой (океан, пустыня и промышленно-развитые регионы Китая, Кореи и Японии) приводит к высокой изменчивости аэрозоля и многообразию его состава. Данные наземных и спутниковых измерений в Юго-Восточной Азии в целом и в российском Приморье в частности показывают, что выносы пустынного минерального (пустыня Гоби) и антропогенного (Восточный Китай) аэрозоля существенно влияют на мутность атмосферы (Сакерин и др., 2011а).

Таким образом, Приморье является регионом с выраженной изменчивостью факторов, формирующих атмосферный аэрозоль пограничного слоя. В этих условиях представляется важным получить детальную картину пространственных и временных изменений АОТ и дополнить уже имеющиеся обобщения данными многолетних наблюдений отечественной актинометрической сети Росгидромета (далее — ГМС-данными). При этом с очевидностью вытекает необходимость сопоставления оценок АОТ, полученных по данным различных наблюдательных систем (например, AERONET, ИСЗ и ГМС).

### **Характеристика используемых данных**

В настоящей работе для анализа использована информация об АОТ, полученная различными наблюдательными системами: наземной международной сетью AERONET (Aerosol Robotic Network), наземной актинометрической сетью Росгидромета, искусственными спутниками Земли Тегга.

Совместный анализ аэрозольного ослабления по независимым системам наблюдений позволяет получать более обоснованные оценки временных трендов и пространственных изменений АОТ.

В работе проанализированы данные дневного (суточного), месячного и годового разрешения.

В Приморье с 2004 г. в составе сети AERONET функционирует станция Уссурийск (Горнотаёжная) с координатами 47,7° с. ш. и 132,1° в. д. Измерения АОТ атмосферы выполняются фотометром CIMEL. Результаты представлены в открытом доступе на сайте

<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.

Для анализа использовались данные суточного разрешения уровня 1.5. Значения АОТ для  $\lambda = 500$  нм были пересчитаны для длины волны 550 нм:

$$\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad \alpha = -\frac{d \ln \tau_a}{d \ln \lambda},$$

где  $\tau_a$  — АОТ для длины волны  $\lambda$ ,  $\alpha$  — параметр Ангстрема,  $\beta$  — показатель спектрального ослабления Ангстрема (принят, равным 1).

Для более детального анализа АОТ в Приморском регионе в целом и на станции Уссурийск, в частности, были привлечены данные актинометрических наблюдений, выполняемых на наземных актинометрических станциях (см. рис. 1). Девять актинометрических станций сравнительно равномерно расположены по территории рассматриваемого региона. Измерения на представленных на рис. 1 станциях проводились в 2008—2015 гг. (Сад-Город и Тимирязевский), в 1976—2014 гг. (Рудная Пристань) и в 1976—2015 гг. (остальные станции). На основе данных сетевых наблюдений АОТ рассчитывается по прямой солнечной радиации и влагосодержанию атмосферы. Результаты анализа представлены в серии публикаций (Плахина и др., 2007; 2009; 2011; Махоткина и др., 2010; Хлебникова и др., 2014).

В качестве спутниковой информации об АОТ использовались данные ИСЗ Тегга, выполняемые спектрорадиометром MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), размещенные на сайте <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

Значения АОТ 3-го уровня (средние суточные) для длины волны 550 нм с разрешением  $1 \times 1^\circ$  были скачаны и проанализированы для 2-х доменов над точками Уссурийск (Сад-Город) и Тимирязевский (см. рис. 1).

Для проведения сравнения значений АОТ атмосферы, получаемых независимыми системами наблюдений, было проведено извлечение данных MODIS и AERONET и сформирован объединенный архив синхронных дневных значений АОТ попарно по 3-м видам наблюдений. Методика инвентаризации и синхронизации значений АОТ была описана в работе Н. В. Панкратовой с соавторами (2016). Синхронизированные данные получены для периода с марта по

октябрь. В зимние месяцы синхронные данные практически отсутствуют.

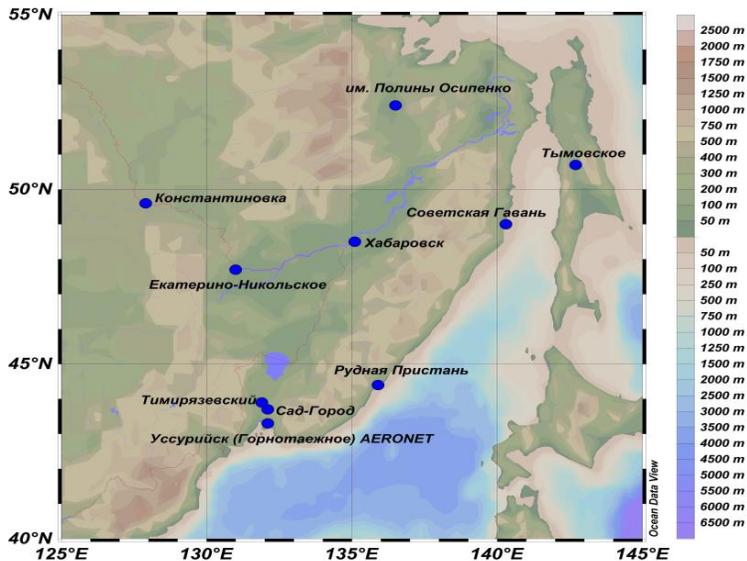


Рис. 1. Карта–схема актинометрических станций (сеть Росгидромета и AERONET) в Приморье.

Предварительно была произведена «ручная» выбраковка значений АОТ, отброшены ситуации, когда АОТ различаются более, чем в 3 раза с учетом тенденций изменения АОТ во времени.

### Результаты анализа пространственно-временной изменчивости АОТ в Дальневосточном Приморье

Ранее при рассмотрении данных российских станций AERONET было замечено, что в период 2005—2015 гг. на станции Уссурийск в отдельные месяцы зафиксированы очень высокие значения АОТ, существенно превышающие значения АОТ на других станциях

(Махоткина, Плахина, 2014). Так, в июле 2006 г. АОТ составило 0,72, в мае 2008 г. — 0,65, в июне 2009 г. — 0,87. Для сравнения следует указать, что летом 2010 г. в условиях аномальной дымной мглы в Москве по данным метеорологической обсерватории МГУ среднее месячное значение АОТ в августе составило 0,35. В последующие годы (с 2010 по 2015 гг.) на станции Уссурийск столь резкие выбросы АОТ не отмечаются, но уровень аэрозольной мутности по сравнению с другими станциями региона остается высоким.

Среднее значение АОТ на станции Уссурийск за период 2005—2015 гг. составляет 0,29, что на 30% превышает среднее АОТ для всех российских станций AERONET.

На рис. 2 представлен средний за период 2008—2015 гг. (8 лет) годовой ход АОТ для станции Уссурийск и 9 актинометрических станций Приморья, которые разделены на 2 группы (1 группа — Сад-Город и Тимирязевский 2 группа — Екатерино-Никольское, Хабаровск, Советская Гавань, Константиновка, Тымовское, им. Полины Осипенко, Рудная Пристань).

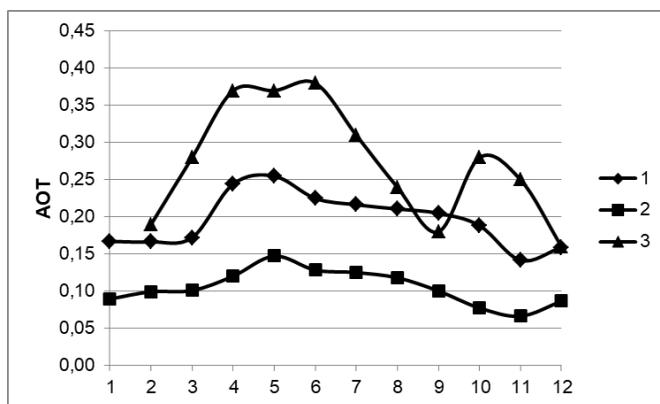


Рис. 2. Средний в период 2008—2015 гг. годовой ход АОТ.

- 1 — станции Сад-Город и Тимирязевский,
- 2 — станции Екатерино-Никольское, Хабаровск, Советская Гавань, Константиновка, Тымовское, им. Полины Осипенко, Рудная Пристань;
- 3 — станция Уссурийск.

Годовой ход АОТ для станций региона типичен для относительно чистых регионов умеренных широт Северного полушария. Максимум АОТ наблюдается в апреле — мае, в отдельные годы повышенные значения АОТ фиксируются в сентябре — октябре. Низкие значения АОТ характерны для поздней осени и чаще всего наблюдаются в ноябре. Четко выраженный минимум отмечается только на станции Уссурийск (сентябрь).

Для станций Сад-Город и Тимирязевский характерны существенно более высокие средние месячные значения АОТ, чем для других станций. Различия в значениях АОТ составляют в среднем порядка 50 % (соответствующие средние годовые значения АОТ составили 0,20 и 0,09). Такие сезонные вариации аэрозольной мутности атмосферы очевидно связаны с характером атмосферной циркуляции в регионе: насыщенные аэрозолями воздушные массы поступают в регион с юга и юго-востока в весенний период, а сравнительно «чистые» воздушные массы из северо-восточной Сибири и с Тихого океана приходят в Приморье в осенние и зимние месяцы (Исследования, 2012).

Отличия годового хода АОТ на станции Уссурийск от годового хода АОТ, полученного для актинометрических станций, проявляются достаточно явно.

В годовом ходе интегральной мутности атмосферы (фактора мутности  $T_2$ ) не прослеживается весенний максимум. Максимальные значения  $T_2$  отмечаются в летние месяцы, минимальные — осенью и зимой. Совместный анализ данных  $T_2$  и АОТ для станций Сад-Город и Тимирязевский показывает, что их изменения во времени (от года к году) происходят достаточно синхронно, что свидетельствует о ведущей роли аэрозоля в наблюдаемых вариациях мутности атмосферы.

Повышение мутности атмосферы, приводящие к появлению экстремально высоких месячных значений АОТ, на станциях Уссурийск, Сад-Город и Тимирязевский происходит не синхронно (см. табл. 2)

Особенности годового хода на станциях региона Приморья четко прослеживаются на пространственных схемах (рис. 3).

Высокие средние месячные АОТ наблюдаются на всем указанном временном интервале для станций, расположенных южнее  $44^\circ$  с. ш., а севернее  $44^\circ$  с. ш. месячные АОТ, как правило ниже.

Таблица 2

**Максимальные месячные значения АОТ, зафиксированные  
за период 2008—2015 гг.**

Месяц	АОТ <sub>max</sub>	Год	АОТ <sub>max</sub>	Год	АОТ <sub>max</sub>	Год
	<i>Уссурийск</i>		<i>Сад-Город</i>		<i>Тимиразевский</i>	
I	—	—	0,21	2008	0,23	2011
II	0,20	2012	0,20	2009	0,23	2011
III	0,35	2012	0,21	2012	0,20	2015
IV	0,46	2012	0,44	2008	0,26	2014
V	0,65	2008	0,35	2009	0,31	2010
VI	0,87	2009	0,34	2010	0,44	2010
VII	0,61	2009	0,28	2009	0,30	2014
VIII	0,33	2008	0,28	2008	0,28	2014
IX	0,20	2011	0,35	2008	0,77	2009
X	0,44	2008	0,30	2008	0,22	2011
XI	0,38	2010	0,19	2009	0,18	2015
XII	—	—	0,23	2009	0,21	2009

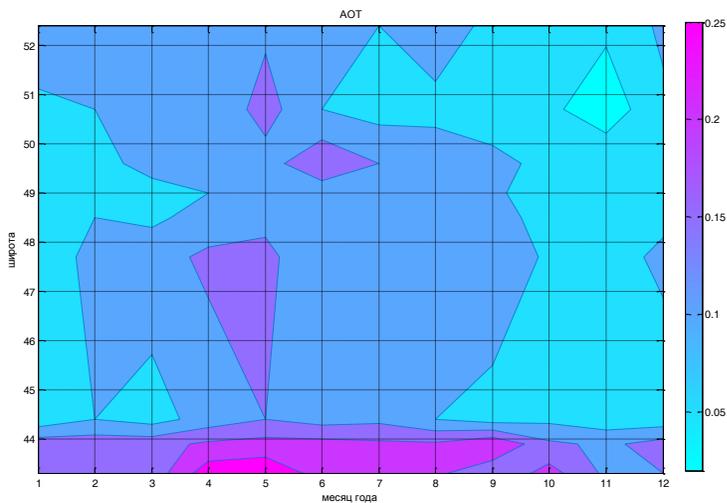
Примечание:

На станции Уссурийск данные за январь и декабрь отсутствуют.

Максимальные за рассматриваемый период месячные значения АОТ (рис. 3б) так же, как и средние месячные АОТ, наблюдаются на юге Приморья в мае и сентябре. Можно предположить, что в эти месяцы происходили частые затоки воздуха с высоким содержанием аэрозоля в отдельные дни месяца. В апреле — июле максимальные месячные значения АОТ (АОТ порядка 0,30) наблюдаются по всему рассматриваемому региону. Вероятно наблюдаемая картина обусловлена адвективным переносом воздушных масс из промышленно развитых районов северо-восточного Китая.

Для иллюстрации на рис. 4 представлены обратные изэнтропические траектории на базе NOAA HYSPLIT, поля GDAS разрешения  $0,5^\circ \times 1,5^\circ$  для 16 и 31 мая 2010 года, для которых АОТ составляют соответственно 0,53 и 0,15. Для каждого дня рассчитаны 5 траекторий с 10 до 15 часов (локального времени) с дискретностью в 1 ч и длительностью по времени 72 часа.

*a*



*б*

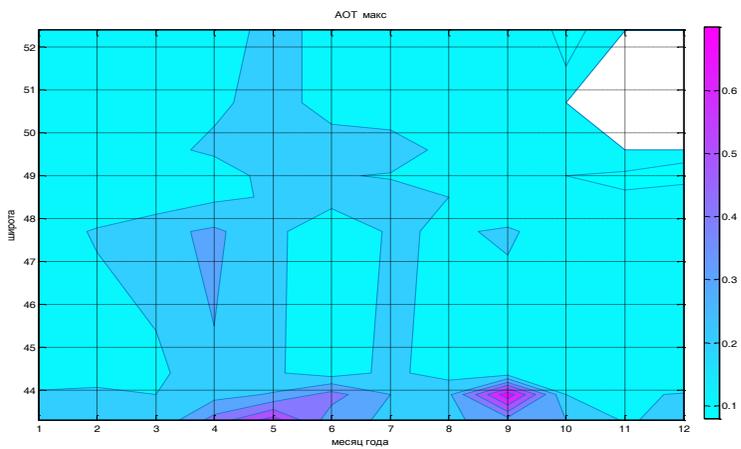
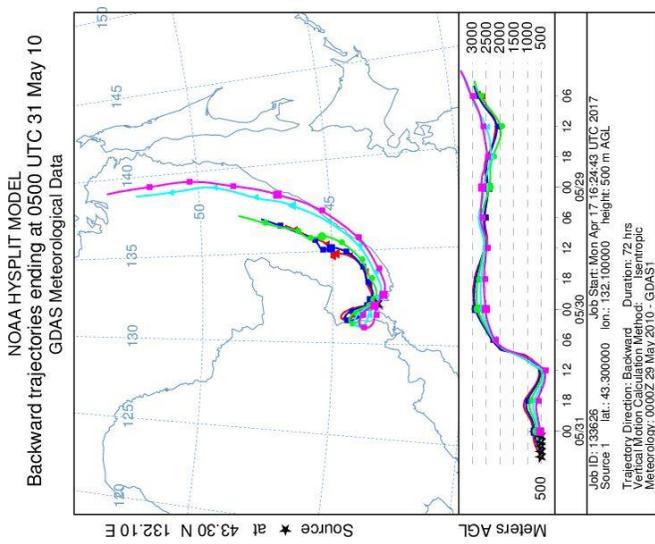
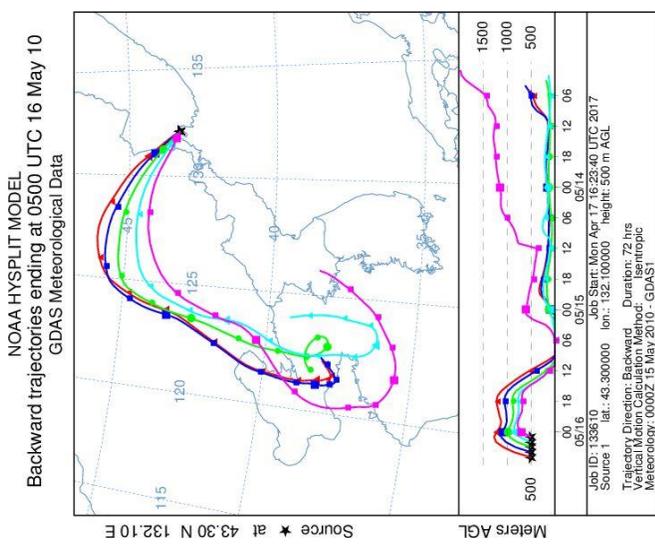


Рис. 3. Пространственные изменения годового хода среднемесячных (*a*) и максимальных месячных (*б*) значений АОТ.



б)



а)

Рис. 4. Пути адвективного переноса воздушных масс, построенные методом изозонтических обратных траекторий в точку Сад-Город.

а) 16 мая 2010 г. (AOT = 0,53), б) 31 мая 2010 г. (AOT = 0,15).

Как следует из рис. 4, 16 мая 2010 года в атмосфере на всех высотах существовал устойчивый по времени перенос воздушных масс из северо-восточных густонаселенных и промышленно-развитых районов Китая, обусловивший аномально высокую мутность атмосферы; 31 мая 2010 г., напротив, происходил устойчивый по времени и однородный по высоте заток воздушных масс с севера, траектория которого проходила вдоль побережья, обусловивший минимальное значение АОТ (0,15).

### **Сравнение АОТ атмосферы, полученной по спутниковым наблюдениям MODIS и данным наземных сетей**

Совместный анализ данных спутниковых и наземных наблюдений АОТ атмосферы проведен для территории в пределах 40°—55°с. ш. и 130°—145° в. д. за период 2008—2015 гг. Объектом исследования явились дневные значения АОТ, полученные на станциях Уссурийск (AERONET), Сад-Город (ГМС), а также дневные величины АОТ, полученные со спутников Terra (MODIS) для домена Уссурийск — Сад-Город. Результаты сравнения представлены в табл. 3.

*Таблица 3*

#### **Обобщенные данные о дневных значениях АОТ в период 2008—2015 гг.**

Станция, источник получения АОТ	АОТ			
	среднее	максимальное	СКО	Число дней
Уссурийск, MODIS	0,26	1,53	0,18	442
Уссурийск, AERONET	0,28	1,25	0,19	
Уссурийск, MODIS	0,26	1,08	0,17	221
Сад-Город ГМС	0,26	0,92	0,16	
Уссурийск, AERONET	0,22	1,05	0,15	376
Сад-Город ГМС	0,22	1,00	0,14	

Анализ попарно синхронизированных рядов дневных значений АОТ выявил существенный разброс единичных значений относительно средних по всему интервалу наблюдения. При этом средние значения АОТ при объеме выборки в несколько сот точек для наземных систем наблюдений (AERONET и ГМС) и спутниковых данных (MODIS) оказались близки как по величине средних, так и по диапазону вариаций (стандартное отклонение от среднего для синхронизированных рядов). Отметим, что именно осреднения в несколько лет и более лет требуются для параметризации моделей и валидации результатов в региональных климатических исследованиях (IPCC, 2007; IPCC, 2013).

Сравнение дневных АОТ по наземным (AERONET) и спутниковым (MODIS) наблюдениям проведено для станции Уссурийск. Результаты этого сравнения представлены на рис. 5.

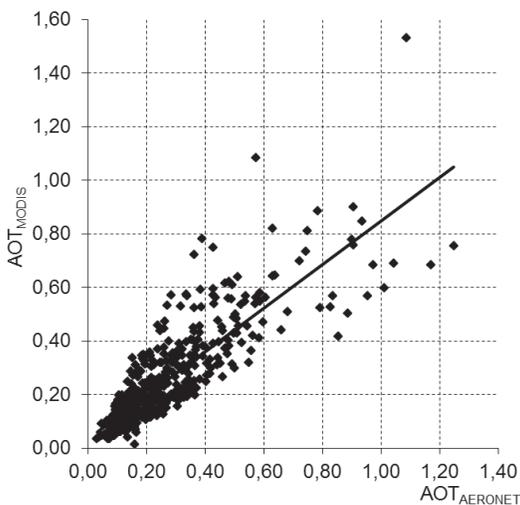
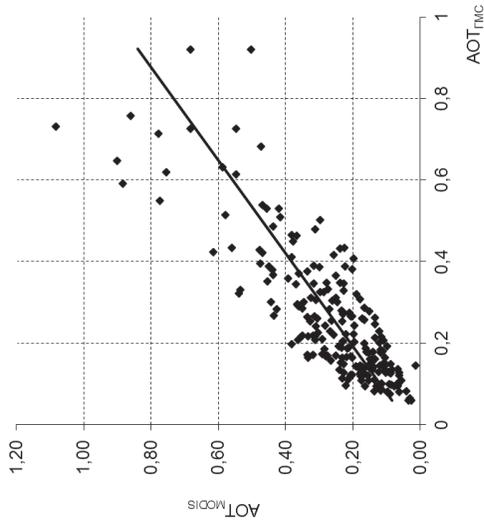


Рис. 5. Сравнение среднедневных значений  $AOT_{500}$ , полученных по наблюдениям сети AERONET ( $AOT_{AERONET}$ ) и спутниковым наблюдениям ( $AOT_{MODIS}$ ) на станции Уссурийск.

$$y = 0,82x + 0,04, R^2 = 0,71.$$

а)



б)

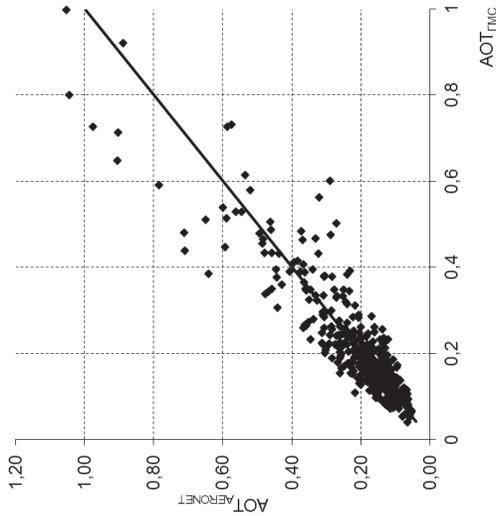


Рис. 6. Сравнение дневных значений  $AOT_{500}$ , полученных для станций Сад-Город — Уссурийск по наблюдениям:

а) — сети ГМС ( $AOT_{ГМС}$ ) и спутниковым наблюдениям ( $AOT_{MODIS}$ ),

$$y = 0,88x + 0,03, R^2 = 0,69;$$

б) — сети ГМС ( $AOT_{ГМС}$ ) и сети АERONET ( $AOT_{АERONET}$ ) для станций Сад-Город — Уссурийск.

$$y = 1,00x + 0,02, R^2 = 0,82.$$

Значения  $AOT_{AERONET}$  оказываются, как правило, выше соответствующих значений  $AOT_{MODIS}$ . Причинами расхождений могут быть различия в процедурах исключения «облачных» воздействий, асинхронность измерений и т. п. При увеличении периода осреднения сходимость данных существенно повышается. Так, в работе С. М. Сакерина с соавторами (2011а) указывается, что при сравнении многолетних средних месячных значений  $AOT$   $R^2$  повышается до 0,86 при  $\sigma = 0,06$ .

Результаты аналогичного сравнения дневных  $AOT$  для станций Сад–Город и Уссурийск дали близкие результаты (рис. 6).

Расхождения в дневных значениях  $AOT$  при сравнении  $AERONET$  и ГМС-данных обусловлены некоторыми различиями местоположения пунктов наблюдений, здесь могут возникнуть искажения за счет неоднородностей поля облаков, локальных особенностями состояния атмосферы, в частности, адвекцией воздушных масс с характерным временем существования около суток. При сравнении наземных ГМС и  $AERONET$ -данных и спутниковых  $MODIS$ -данных по  $AOT$  играют роль разные способы пространственного осреднения при наземной и спутниковой регистрации, а также по-разному выраженные влияния приповерхностного слоя атмосферы и наличие тонких облаков верхнего яруса. Но предваряющая сравнения фильтрация (отбраковка) данных обеспечивает вполне приемлемое соотношение статистических параметров рядов и их относительной изменчивости.

### **Заключение**

Проблема выявления изменений аэрозольной оптической толщины атмосферы ( $AOT$ ) в различных регионах России по данным спутниковых ( $MODIS$ ) и наземных ( $AERONET$ ) наблюдений в последнее 10-тилетие привлекает внимание отечественных и зарубежных исследователей.

Анализ временных изменений  $AOT$  атмосферы на территории Дальнего Востока, выполненный по данным актинометрических станций Росгидромета в комплексе с данными сети  $AERONET$  и спутниковыми наблюдениям, показал, что в рядах месячных и суточных  $AOT$  нередко фиксируются экстремально высокие значения аэрозольной мутности,

формирующиеся под влиянием трансграничного переноса воздушных масс с территории Монголии, северо-восточного Китая а также со стороны океана.

Для различных частей региона имеются и установлены различия в годовом ходе АОТ, обусловленные особенностями расположения отдельных станций. Выделены два типа годового хода: для станций, расположенных на побережье, имеется выраженный максимум годового в мае, на станциях, расположенных внутри материка АОТ меняется более плавно, чем на побережье, максимум годового хода также приходится на май, а минимум на ноябрь.

Станции Тимирязевский, Сад-Город, расположенные в непосредственной близости друг от друга и от станции Уссурийск, имеют четко выраженный годовой ход АОТ с максимумом весной (май) и низкими значениями в осенне-зимний период. Представленные в работе средние и экстремальные месячные значения АОТ свидетельствуют о том, что зафиксированные резкие возмущения могут быть обусловлены как местными особенностями, так и выносами воздуха из густонаселенных районов Китая.

Относительно кратковременные изменения АОТ, обусловленные адвективным заточками воздушных масс с высоким содержанием аэрозоля из Китая, рассмотрены по данным мониторинга дневных величин АОТ. Резкие изменения АОТ в отдельные дни исследованы с привлечением метода обратных траекторий.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 15-05-05803.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Исследование радиационных характеристик аэрозоля в Азиатской части России (2012) // под ред. С. М. Сакерина — Томск: ИОА СО РАН. 484 с.

*Махоткина Е. Л., Плахина И. Н., Лукин А. Б.* (2010). Выявление изменений интегральной и аэрозольной мутности атмосферы в Забайкалье и Центральной Сибири // Метеорология и гидрология. № 1. С. 53—67.

*Махоткина Е. Л., Плахина И. Н.* (2014). Мониторинг прозрачности атмосферы: результаты измерений за последние десятилетия. Обзор // Труды ГГО. Вып. 572. С. 57—88.

ОД\_РФ-1 (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации Том 1. — М.: Росгидромет. 225 с.

ОД\_РФ-2 (2014). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014). — М.: Росгидромет. 1005 с.

*Панкратова Н. В., Плахина И. Н., Махоткин А. Н.* (2016). Сравнение данных наземного и спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России // Труды ГГО. Вып. 583. С. 252—264.

*Плахина И. Н., Махоткина Е. Л., Панкратова Н. В.* (2009). Вариации аэрозоля в толще атмосферы по данным российской актинометрической сети (1976—2006 гг.) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 45. № 4. С. 489—500.

*Плахина И. Н., Махоткина Е. Л., Панкратова Н. В.* (2011). Пространственные вариации фактора мутности атмосферы над европейской территорией России в условиях аномального лета 2010 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 47. № 6. С. 1—6.

*Поддубный В. А., Лужецкая А. П., Сакерин С. М. и др.* (2013). Особенности оптических характеристик атмосферного аэрозоля на среднем Урале // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 49. № 3. С. 314.

*Сакерин С. М., Береснев С. А., Горда С. Ю. и др.* (2009). Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т. 22. № 6. С. 566—574.

*Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Бедарёва Т. В., Кабанов Д. М., Корниенко Г. И., Holben V., Смирнов А.* (2011a). Аэрозольная оптическая толщина атмосферы в дальневосточном Приморье по данным спутниковых и наземных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. Т. 24. № 8. С. 654—660.

*Сакерин С. М., Афонин С. В., Кабанов Д. М., и др.* (2011б). Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в Приморье и прилегающих морях в августе 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. Т. 24. № 9. С. 731—736.

*Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Бедарёва Т. В., Кабанов Д. М.* (2012a). Особенности пространственного распределения аэрозольной оптической толщи атмосферы в азиатской части России // Оптика атмосферы и океана. Т. 25. № 6. С. 484—490.

*Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Бедарёва Т. В., Кабанов Д. М., Поддубный В. А., Лужецкая А. П.* (2012б). Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы на территории Поволжья, Урала и Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т. 25. № 11. С. 958—962.

*Сакерин С. М., Чернов Д. Г. и др.* (2012в). Предварительные результаты исследований аэрозольных характеристик атмосферы в районе Баренцбурга (Щпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. № 1 (91). С. 20—31.

*Хлебникова Е. И., Махоткина Е. Л., Салль И. А.* (2014). Облачность и

радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения // Труды ГГО. Вып. 573. С. 65—91.

IPCC. (2007). Climate Change Working Group I. Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report of Climate Change: The Physical Science Basis. Ch.2. P. 130—234. Cambridge University Press.

IPCC. (2013). Climate Change Working Group I. Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report of Climate Change: The Physical Science Basis. Ch. 7. 1535 p. Cambridge University Press.

## **АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ И ИХ СВЯЗИ С МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

*Г. И. Мазуров, В. И. Акселевич*

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

Поступила в редакцию 24.09.2017  
Поступила после доработки 1.11.2017

### **Введение**

Лесной пожар — сложный комплекс физических и химических процессов, влияющих на экосистемы всех уровней. Лесные пожары наносят серьезный ущерб окружающей среде. Ежегодно на территории России выгорают огромные лесные пространства, на восстановление которых требуется от 50 до 100 лет. Именно такой период потребовался для восстановления тайги после падения Тунгусского метеорита.

На активно охраняемой территории лесного фонда России каждый год регистрируется от 10 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 0,1 до 2,5 млн га (Одинцов, 1996). С учетом горимости лесов на неохраняемых и эпизодически охраняемых территориях северных районов Сибири и Дальнего Востока пройденная огнем площадь составляет от 2,0 до 5,5 млн га (Валендик, 1990; Conard, Ivanova, 1997; Ваганов и др., 1998; Сухинин, 2001). В результате сгорания органических материалов с этих площадей ежегодно выделяется от 14,0 до 40,0 Мт углерода, что причиняет огромный экологический и материальный ущерб (Иванова, 2005).

Анализ причин возникновения лесных пожаров и их связь с метеорологическими параметрами являются целью статьи.

## Климатологические аспекты возникновения пожаров

Согласно (Энциклопедия, 2005) для оценки продуктивности лесоклиматических ресурсов Российской Федерации используются следующие параметры: радиационный баланс, количество осадков, сумма активных температур, продолжительность вегетации, показатель увлажнения, индекс континентальности, число дней с сильным ветром, пожароопасность, число дней с низкой температурой воздуха. Каждый параметр учитывается с определенным весом. Максимальный вес присваивается показателю увлажнения, радиационному балансу и осадкам. Экстремальные значения скорости ветра и пожароопасность рассматриваются как антитезисы.

В отечественной лесохозяйственной практике (Воробьев и др., 2004) пожары делятся на 3 типа, в зависимости от того в каких «этажах» лесного массива происходит преобладающее распространение огня:

— низовые (наземные, лесоторфяные) пожары, на долю которых в среднем приходится 97—98 % общего числа пожаров и 87—90 % пройденной огнем общей площади;

— верховые (лесные) пожары, на долю которых приходится 1,5—2 % общего числа и 10—12 % лесной площади, пройденной пожарами;

— подземные (торфяные, почвенные) пожары, относительно редкие.

Лесные пожары определяют состояние и динамику лесного фонда России, особенно в районах Сибири и Дальнего Востока.

Источниками возгорания являются 2 основных фактора:

— антропогенный (оставленный без присмотра костер, неосторожное обращение с огнем, брошенный окурок или спичка, несанкционированные запалы (сельхозпалы), охотничьи пыжи, эффект линзы на стеклянных осколках, умышленный поджог);

— природный (сухая гроза, самовозгорание торфа, искрение камней, падающих с гор, падение метеоритов, горящие частицы извержения вулканов).

Гидротермический режим является определяющим в фоновой картине пожароопасности (Валендик, 1990).

### **Особенности возникновения и распространения пожаров в Сибири**

На территории Сибири ежегодно возникают десятки тысяч лесных пожаров (Одинцов, 1996).

Основная черта климата рассматриваемой территории — резкая континентальность, возрастающая с запада на восток (Алисов, 1956). Весна и начало лета засушливы. Лето хотя и короткое, но в большинстве районов теплое и иногда даже жаркое. Для осени характерна продолжительная солнечная, сухая и относительно теплая погода. Наличие длительных засушливых периодов способствует возникновению лесных пожаров и распространению лесных пожаров (Иванова, 2005).

Пожарная опасность в лесах Сибири определяется, прежде всего, природными особенностями территории — значительной долей хвойных лесов (средняя лесистость территории района — 55 %), развитым горимым надпочвенным покровом.

Причинами пожаров, максимум которых совпадает со временем наибольших рекреационных нагрузок (грибной август, суббота-воскресенье), является, чаще всего, неосторожное обращение с огнем (антропогенный фактор). Воздействие только погодных метеорологических параметров практически не влияет на количество лесных пожаров (см. табл. 1).

Совокупное воздействие нескольких факторов, таких как наблюдающееся региональное потепление, изменение гидрологического режима и усиливающееся освоение района за счет разработки месторождений газа и нефти и строительство от них трубопроводов заметно повышает пожароопасность.

Длительность фактического пожароопасного сезона зависит от географической широты и возрастает с севера на юг с 88 до 173 дней (Мелехов, 1946; Мокеев, 1965).

**Количество пожаров, зафиксированных на территории  
Обь-Томского междуречья и средние температура и количество осадков  
(за период апрель—сентябрь) 2003—2013 гг. (Панченко, 2015)**

Год	Количество пожаров	Температура воздуха	Количество осадков
2003	321	12,9	43,3
2004	153	12,7	64,6
2005	139	12,5	63,9
2006	130	11	54,4
2007	32	12,6	64
2008	88	11,8	47,2
2010	97	10,8	47,3
2011	119	12,7	60,8
2012	385	13,8	48
2013	22	14,3	59,4

Количество лесных пожаров варьирует по годам. Преобладают низовые пожары разной интенсивности, на долю которых приходится более 90 % от их общего числа. Пожары, возникающие от гроз, составляют 32 % от общего числа, но основная причина возникновения пожаров — хозяйственная деятельность населения (Иванова, 2005).

Распределение пожаров по территории региона неравномерно. Анализ пожаров на охраняемой территории за период с 1986 по 2000 гг. в зависимости от лесорастительной зоны показал, что основное количество пожаров (по числу и площади) приходится на южную тайгу, где произрастает основная часть сосновых лесов и имеется большое количество вырубок, быстро достигающих состояния пожарной зрелости.

В северной и средней тайге максимальное число лесных пожаров приходится на июль. В южной тайге кроме летнего пика горимости в июле наблюдается и ранневесенний в мае (иногда даже в марте, как это было в 2000 году), когда горят леса, расположенные в логах с

заболоченными почвами, в основном, ельники, сосняки, березняки на болотах с проточной водой. В подтаежной и лесостепной зонах максимум возгораний приходится на май—июнь, а в горных лесах юга Средней Сибири — на май. Однако в засушливые периоды пожары могут возникать в течение всего пожароопасного сезона.

Повышенное количество пожаров (до 1600) в 2003 году можно объяснить, как малым количеством осадков (43,3 мм), так и выбросом значительного количества метана (48,8 млн т) и других сопутствующих газов (Ульбаев и др., 2013), способных к самовозгоранию при низких температурах (например, дифосфин, самовозгорающийся при 20—30 °С). Информацию о выбросах метана в 2012 году получить не удалось.

Возгорание лесных массивов легче предотвратить, когда складывается хотя бы третья стадия пожароопасности, чем тушить. В случае пожара возникает интенсивное загрязнение атмосферы, гидросферы и почвы, а также наносится значительный материальный ущерб лесному хозяйству. Тушение пожара с использованием авиации опасно из-за высоких температур (Мазуров, 2016).

### **Исходный материал и методика исследования**

При проведении исследования в качестве исходного материала была использована информация о месячном количестве осадков за период 1992—2014 гг. по 3 станциям: Енисейск, Красноярское опытное поле и Абакан. Эти данные были заимствованы на сайте <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation>. Было проанализировано более 820 месячных данных. Кроме того, была рассмотрена информация о количестве пожаров с 1990 по 1999 гг. вблизи авиабазы Красноярского края, о площади пройденной огнем и числе пожаров по Красноярскому краю, о возникновении пожаров в период 2000—2016 гг. и количестве пожаров, потушенных за этот период с использованием авиации (Козлов, 2011).

Выбранные станции расположены в достаточно различных физико-географических районах, на разных широтах: 58<sup>0</sup>, 56<sup>0</sup> и 53<sup>0</sup> с. ш. соответственно и примерно на одинаковой долготе (92<sup>0</sup> и

91<sup>0</sup> в. д.). Метеостанция Абакан находится в котловине на высоте около 250 м и не является достаточно репрезентативной. Станции севернее широты 60<sup>0</sup> с. ш. к анализу не привлекались, так как там начинается лесотундра, где деревьев мало и они низкорослые, а далее к северу располагается тундра, где деревьев нет. Расчеты по характеристикам осадков были выполнены для 6-ти месяцев холодного периода (октябрь—март) и для 2-го (апрель—июнь) и 3-го (июль—сентябрь) кварталов года. Такой выбор периодов объясняется тем, что в холодный период снежный покров накапливается, а в теплый период, когда именно наблюдаются лесные пожары, дожди непосредственно заливают очаг пожара, если попадают на него. Как правило, дождей больше во вторую половину лета и осенью, чем весной и в начале лета. Поэтому теплый сезон разделен на 2 квартала.

При проведении исследования ставилась задача связать малое количество осадков в холодное полугодие с ранним началом лесных пожаров и проследить зависимость площади горения и количества пожаров от количества осадков, выпавших во 2-м и 3-м кварталах.

Расчеты производились по среднемесячным значениям количества осадков ( $n$ ) за холодный период (135 значений для каждого пункта) и для 2-х кварталов (69 значений для каждого квартала и пункта) за период с 1992 по 2014 гг.

Среднемесячное количество осадков ( $n$ ) за холодное полугодие или квартал рассчитывалось по формуле:

$$n = \sum x / m \quad (1),$$

где  $x$  — количество осадков за каждый месяц;  
для холодного периода  $m = 6$ , для кварталов  $m = 3$ .

Среднее многолетнее количество осадков рассчитывалась по формуле:

$$N = \sum X / m \quad (2),$$

где  $X$  — сумма осадков за 23 холодных полугодия или за 23 квартала теплого полугодия.

После этого для каждого пункта рассчитывалось отклонение месячной суммы осадков от ее среднего многолетнего значения ( $\Delta$ ):

$$\Delta = n - N \quad (3)$$

Поскольку информацию о пожарах по всему Красноярскому краю удалось получить не за все годы, то по значениям  $n$ ,  $N$ ,  $\Delta$ , для каждого из 3-х пунктов были получены средние значения  $n_c$ ,  $N_c$ ,  $\Delta_c$ , которые относились ко всей рассматриваемой территории. Далее  $n_c$ ,  $N_c$ ,  $\Delta_c$  сопоставлялись с началом пожаров в Крае, количеством пожаров и площадью выгорания.

### **Основные результаты расчета и их анализ**

Возгорания лесных массивов можно объяснить малым количеством выпадающих атмосферных осадков, а раннее начало весной — малым количеством снега, выпавшим в течение холодного полугодия. Последнее приводит к углубленному промерзанию почвы и малому запасу влаги в ней, а также к быстрому стоку талой воды по промерзшей почве и, следовательно, должно вызывать ранние пожары весной.

Для выявления влияния количества осадков, их интенсивности, температурного и ветрового режима на возникновение лесных пожаров в качестве рабочих гипотез были приняты следующие:

1. Раннее начало пожаров весной следует объяснить малым количеством осадков в холодное полугодие.

2. Появление пожаров происходит при малом количестве осадков в предшествующий период (месяц).

3. Резкое увеличение количества пожаров происходит в период разрастания пожаров при скорости ветра 3—6 м/с и более.

4. Количество пожаров и раннее их начало определяется отсутствием дождей (малым их количеством) в предшествующий пожарам период.

5. Периоды жары приводят к увеличению количества пожаров (однако пожары могут возникать и при отрицательных температурах, как это было, например, в марте 2000 г.)

6. В условиях дефицита осадков (при отрицательных их аномалиях) следует ожидать увеличение количества пожаров.

7. Быстрое разрастание пожаров прекращается при выпадении осадков и ослаблении скорости ветра.

8. Самовозгорание лесных массивов и торфа возможно при выделении из почвы и болот метана и других сопутствующих газов.

Результаты расчета  $n$  и  $N$  для станций Енисейск, Красноярск и Абакан представлены на рис. 1 за период 1992—2014 гг.

В холодное полугодие на указанных станциях количество осадков невелико. В Абакане осадков выпадает почти в 3 раза меньше, чем в Красноярске и почти в 4 раза меньше, чем в Енисейске. При этом в Енисейске 4 раза было зафиксировано всего около 5 мм осадков в месяц. Отклонение отдельных месячных значений от среднего многолетнего количества осадков в обе стороны незначительно, кроме большого в 2001—2002 г. в Енисейске и в 2009—2010 гг. в Красноярске, а также значительного уменьшения осадков в Красноярске в 1993—1994 гг. Последнее могло спровоцировать раннее возникновение пожаров.

На рис. 2 показаны отклонения от среднего многолетнего значения среднемесячного количества осадков во втором квартале (апрель—июнь) за 23 года (1992—2014 гг.). Почти всем пикам положительных отклонений в Абакане соответствуют пики отрицательных отклонений в Енисейске. Между пиками положительных отклонений в Красноярске и Абакане 2—3 года.

Для оценки пожароопасности необходимо анализировать случаи, когда количество осадков за месяц оказывается на 10 мм и более ниже среднего многолетнего. В Красноярске таких случаев было установлено 5, в Енисейске — 3, а в Абакане только один (в 1992).

В третьем квартале осадков выпадает примерно в 1,5 раза больше, чем во втором, а количество осадков резко меняется от года к году. Среднее количество осадков в Енисейске и Абакане практически совпадает, а в Красноярске оно несколько выше (см. рис. 3). Наименьшее количество осадков наблюдалось в Абакане в 1998 году, в Красноярске в 2001 году, а в Енисейске в 1994 и 1999 годах. Сравнение суммарного количества осадков за холодный период и за 2-й квартал показывает, что за весь холодный период выпадает примерно столько же осадков, как и за 2-й квартал.

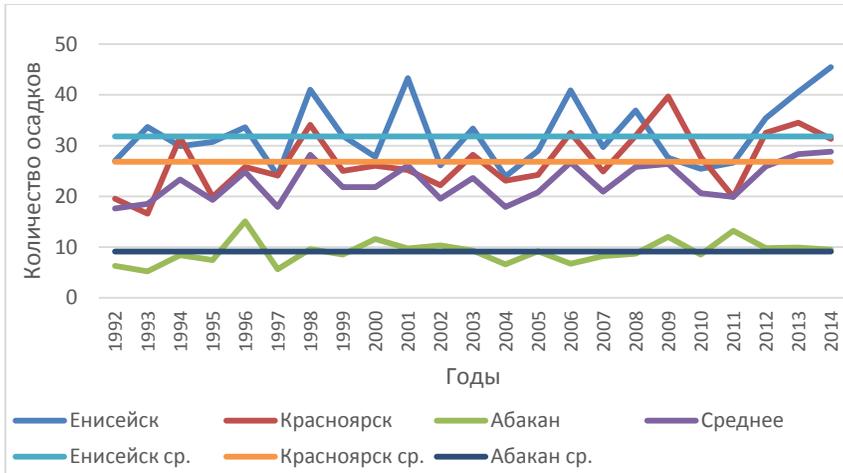


Рис. 1. Среднее многолетнее количество осадков (N) и среднее месячное количество осадков за холодное полугодие (n) для трех пунктов Красноярского края за период 1992—2014 годы.



Рис. 2. Отклонение месячной суммы осадков от ее среднего многолетнего значения ( $\Delta$ ) во втором квартале (апрель — июнь) для трех пунктов Красноярского края за период 1992—2014 гг.

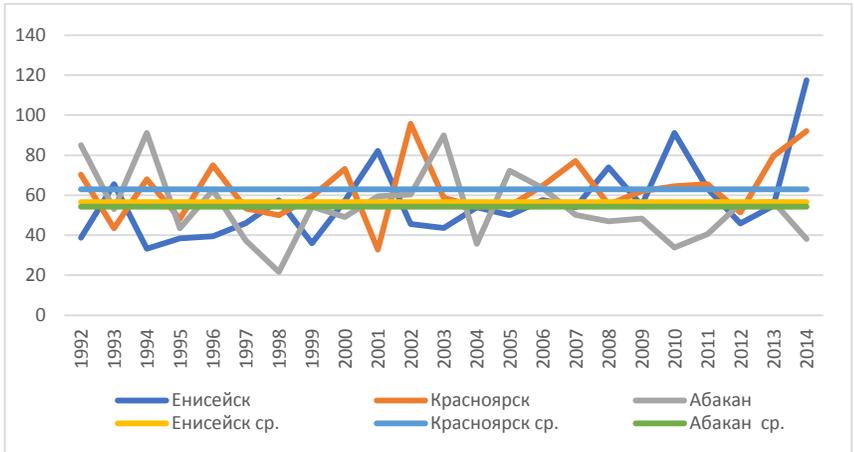


Рис. 3. Среднее многолетнее количество осадков (N) и среднее месячное количество осадков за третий квартал (n) для трех пунктов Красноярского края за период 1992—2014 годы.



Рис. 4. Отклонение месячной суммы осадков от ее среднего многолетнего значения ( $\Delta$ ) в третьем квартале (июль — сентябрь) для трех пунктов Красноярского края за период 1992—2014 гг.

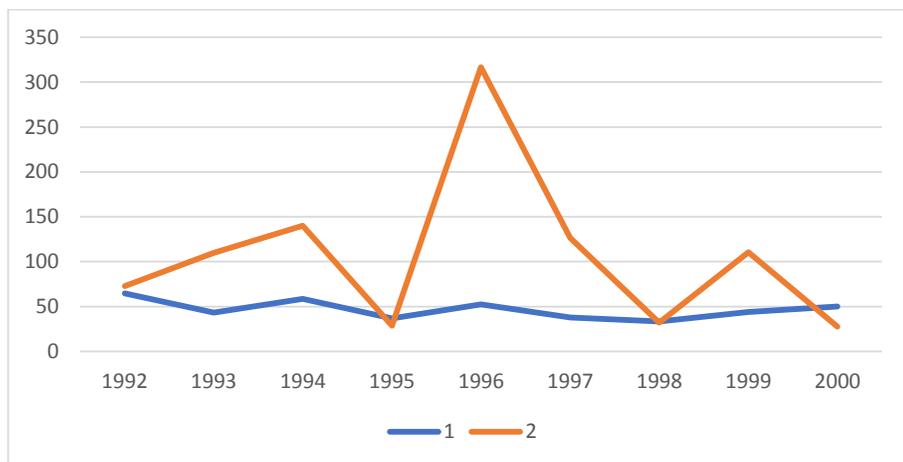


Рис. 5. Площадь пожаров на территории Красноярского края (1) и среднее месячное количество осадков (2) в третьем квартале (июль—сентябрь) в период 1992—2000 гг.

Данные, представленные на рис. 5, показывают отсутствие зависимости площади, пройденной пожаром, от количества осадков. В рассматриваемый период количество осадков в третьем квартале было, как правило, ниже среднего многолетнего.

В табл. 2—3 приведены данные, которые можно использовать для сравнения интенсивности пожаров и площади выгорания с количеством осадков за холодный период в целом и по кварталам.

Так, в табл. 2 представлена информация о начале пожаров, интенсивности их возрастания, количестве пожаров на 1 октября каждого года, количестве осадков и его отклонении от нормы для холодного периода и для 2-го и 3-го кварталов, а также количестве дождей за месяц, предшествующий началу пожаров, диапазоне температур и скоростей ветра при них. В столбце «Диапазон температур» приведены данные о температуре воздуха за две последние недели предыдущего месяца, в столбце «количество дождей» — количество дней с дождем за предыдущий месяц, в

столбце «скорость ветра» указанный диапазон скоростей относится к периоду начала разрастания пожара.

Малоснежные зимы согласно табл. 2 не совпадают с теми годами, когда наблюдалось наибольшее количество пожаров. Даже при превышении среднего за рассматриваемый период количества осадков летом на +11 мм отмечается аномально высокое число пожаров — до 1600 в 2003 и 2011 годах и до 1700 — в 2012 г. Это в 6 раз больше, чем в 2001 году (260 ед.), когда количество выпавших осадков было близко к среднему многолетнему значению. Только в 3-м квартале выпало осадков на 10,6 мм меньше, чем в среднем (табл. 2). В конце 3-го квартала уже может выпадать снег (Справочник по опасным природным явлениям..., 1997), и пожары, как правило, прекращаются, хотя в 2016 г. они отмечались и в ноябре. В этом же году было зафиксировано большое количество торфяных пожаров (особенно в северных районах Красноярского края). При таких пожарах беспламенное горение распространяется в слое подстилки или торфа. Почвенные пожары делятся на подстилочные, дерновые и торфяные. Последние в свою очередь подразделяются на одноочаговые и многоочаговые. Одноочаговые пожары возникают в основном от костров или ударов молний, а многоочаговые — в результате прохождения через заболоченный участок низового пожара.

В 2000 г. пожары стали возникать в марте, когда в тайге еще сохранялся снежный покров, а температура воздуха составляла около 0 °С (а в отдельные дни ниже 0 °С). Аномально раннее начало пожаров 15.03.2000 г. произошло при почти нормальном количестве осадков в холодное полугодие (130 мм). С 4 по 18 марта слабые осадки выпадали только в виде снега (по данным станции Красноярск, опытное поле). В этих условиях при скорости ветра 3—6 м/с наблюдалось очень быстрое разрастание площади, охваченной огнем: за 5 суток (см. табл. 2) было пройдено пожарами 16,9 тыс. га (51,3 га × 66 ед. × 5 суток). Скорость распространения огня в 2000 г. составляла 141 га в час. Средний размер отдельных очагов пожаров оценивался в 51,3 га. После периода резкого разрастания пожаров скорость ветра снизилась до 1—2 м/с.

Таблица 2

### Характеристики лесных пожаров и сопутствующих метеорологических условий в Красноярском крае

Дата первого пожара и период разрастания	Максимальная скорость нарастания, ед./сут	Кол-во пожаров на 01.10, ед.	Количество осадков, мм				Δс за холодный период	Диапазон температур, °С	Кол-во дождей, шт.	Скорость ветра, м/с
			в холодный период/от	во 2-й квартал / от	В 3-й квартал / от	№с				
			№с	№с	№с	№с				
15.03—20.03.2000	по 66 за 5 сут	540	130/-0,3	131/2,3	179/6,6	179/6,6	-1,0	-9÷+6	3	3—6
01.05—05.06.2001	по 8 за 3,5 сут	260	130/-1,0	139/4,7	174/-10,6	174/-10,6	3,3	-1÷+19	11	3—5
25.04—25.05.2002	по 18 за 30 сут	630	156/2,1	122/-0,8	202/34,8	202/34,8	-3,3	3÷17	9	2—4
05.05—30.05.2003	по 42 за 25 сут	1600	117/-1,8	149/8,2	192/26,4	192/26,4	0,8	4÷25	12	3—6
10.05—30.05.2004	по 42 за 20 сут	900	141/-0,7	147/7,5	144/-27,1	144/-27,1	-4,9	1÷19	13	3—6
20.04—25.05.2005	по 20 за 35 сут	900	107/-4,3	162/12,4	177/7,8	177/7,8	-2,0	0÷13	6	2—3
10.05—25.06.2006	по 22 за 45 сут	1300	125/1,1	110/-4,8	186/13,1	186/13,1	3,9	-1÷+13	7	3—6
15.04—05.05.2007	по 28 за 20 сут	800	160/1,6	132/2,4	181/10,3	181/10,3	-1,9	5÷15	7	3—6
20.04—25.05.2008	по 32 за 35 сут	1300	126/0,7	117/-2,6	176/-4,8	176/-4,8	3,0	-7÷+7	6	2—4
20.04—30.05.2009	по 14 за 40 сут	620	155/5,9	143/6,0	165/-6,2	165/-6,2	3,6	1÷15	4	2—4
25.04—30.05.2010	по 14 за 35 сут	700	159/-0,1	86/-12,8	190/0,0	190/0,0	-2,2	-6÷+7	11	2—4
15.04—15.06.2011	по 20 за 60 сут	1500	124/-14,6	117/-2,5	169/-6,2	169/-6,2	-2,9	0÷19	4	3—4
15.04—15.08.2012	по 15 за 120 сут	1700	119/1,6	103/-7,2	153/-13,8	153/-13,8	3,1	0÷16	3	2—3
15.04—25.08.2013	по 3 за 130 сут	450	155/3,5	139/5,0	191/19,6	191/19,6	5,5	-3÷+16	4	2—4
30.03—15.07.2014	по 10 за 105 сут	1100	170/5,8	135/3,5	248/23,0	248/23,0	6,0	-11÷+14	13	3—4
			2074/-0,5	1931/21,	2727/48,	2727/48,				
			Сумма/ Δ с							

**Информация о пожарах за период с 1990 г. по 1999 г.  
(по данным Красноярской авиабазы)**

Год	Количество зафиксированных пожаров										Площадь пожаров	
	март— апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь— ноябрь	итого	общая, тыс. га	средняя, га		
1990	276	862	296	531	202	47	0	2214	176,84	79,9		
1991	22	377	427	143	19	11	1	1000	36,04	36,0		
1992	0	373	251	428	194	0	0	1246	72,74	58,4		
1993	41	339	244	564	187	8	0	1383	109,78	79,4		
1994	29	325	373	444	328	5	0	1504	140,21	93,2		
1995	11	225	32	279	500	22	0	1069	28,53	26,7		
1996	111	450	282	445	128	5	2	1423	316,74	222,6		
1997	253	405	301	168	105	23	79	1334	126,43	94,8		
1998	72	355	138	201	285	29	24	1104	32,1	29,1		
1999	58	809	157	615	118	15	0	1772	110,55	62,4		
Среднее	86,4	461	250	382	206,6	16,5	10,6	1405	112,11	78,25		

Можно предположить, что ранние пожары в 2000 г. были обусловлены малым количеством осадков и возможным выходом из-под треснувшего льда метана и других сопутствующих газов с низкой температурой самовоспламенения. Антропогенный фактор не может в данном случае рассматриваться: маловероятно, что 66 охотников в течение пяти суток в труднодоступных местах разводили костры, которые быстро раздуло ветром.

Как показывают данные табл. 2, в период 2000—2014 гг. пожары в девяти случаях начинались во второй половине апреля, в 4-х случаях — в начале мая и в 2-х случаях — в конце марта (в 2000 и 2014 годах).

Количество пожаров сильно варьирует от года к году и от месяца к месяцу: в 1995 г. площадь одиночного пожара составила 26,7 га, а в 1996 г. — до 222,6 га. Средняя за 10 лет общая площадь пожаров оценивается в 112,11 тыс. га, а площадь одиночного пожара— 78,25 га (см. табл. 3). В 2000 г. скорость нарастания пожаров была максимальной (по 66 пожаров в течении 5 суток), в 2003 и 2004 годах она составляла по 42 пожара за сутки, но период распространения продолжался соответственно 35 и 30 суток. В остальные годы скорость распространения огня была меньше

*Таблица 4*

**Данные о погашенных на территории Красноярского края пожарах (Козлов, 2011)**

	Год							итого
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
Площадь погашенных пожаров	0,026	0,13	3,50	10,17	7,01	2,215	19,03	42,081
Количество погашенных пожаров	1	3	3	12	7	9	20	55

В табл. 4 показаны площади, охваченные пожарами, и число погашенных пожаров в Красноярском крае в период 2000—2006 гг., когда в регионе с привлечением авиации проводились работы по

тушению пожаров искусственным вызыванием осадков. За 7 указанных лет было погашено пожаров на площади более 42 тыс. га, а в 2006 г. — почти 20 тыс. га. К сожалению после 2006 г. договора на вызывание осадков для тушения пожаров не возобновлялись.

На рис. 7 показана площадь, пройденная пожарами в период 2000—2016 гг. Она не коррелирует с количеством пожаров за тот же период (рис. 8). Количество пожаров в Красноярской тайге приведено на 1 октября анализируемого года, хотя в 2016 г. они отмечались и в ноябре месяце на площади более 1 млн км<sup>2</sup> в Иркутской и Амурской областях (рис. 9) и в количестве более 1000 единиц по Красноярскому краю (рис. 10).

Площадь, охваченная огнем, зависит от интенсивности пожара. Резкое увеличение количества пожаров в 2003, 2011 и 2012 годах (рис. 8) совпадает с данными табл. 2 (более 1500 ед.). В 2003 г. количество осадков в холодный период несколько превысило их средний многолетний уровень (на 0,8 мм). Это привело к началу пожаров 5.05.2003 г., что совпадает со средним сроком начала пожаров (в табл. 2).

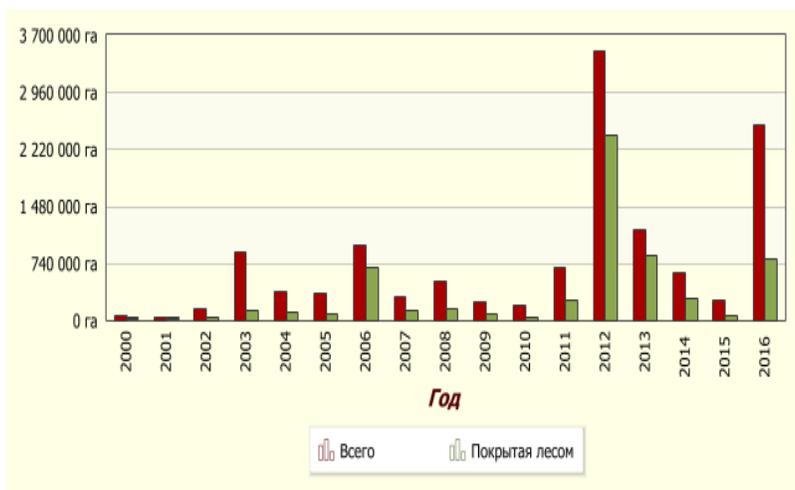


Рис. 7. Площадь, пройденная огнем в Красноярском крае в 2000—2016 гг.

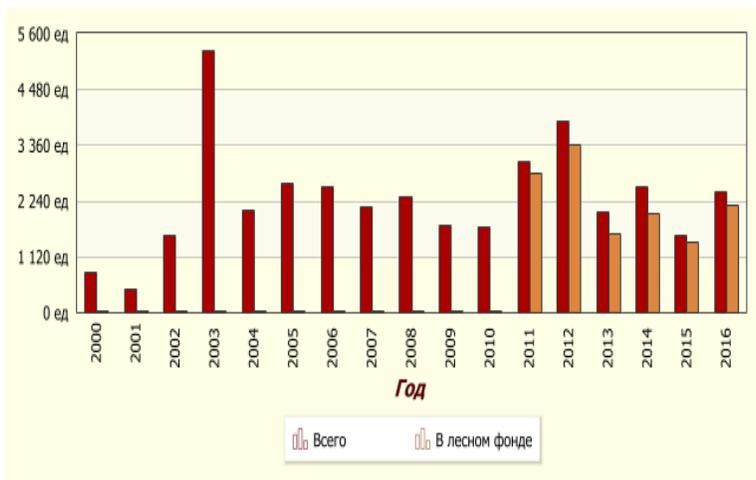


Рис. 8. Число пожаров в Красноярском крае в 2000—2016 гг.

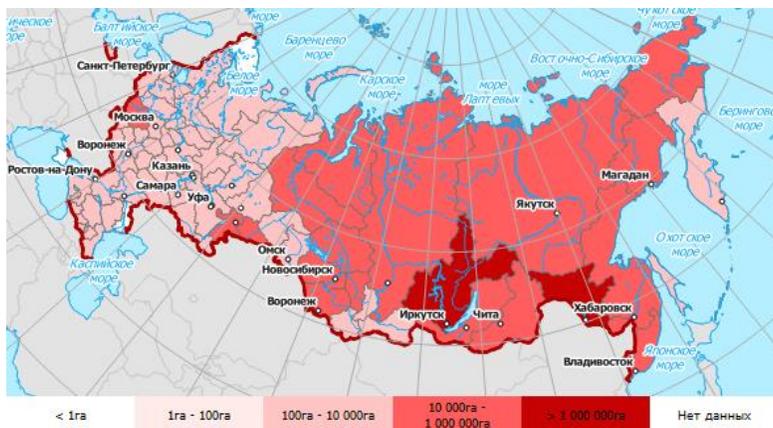


Рис. 9. Площадь, пройденная огнем пожаров по территории России к 12.11.2016 г.

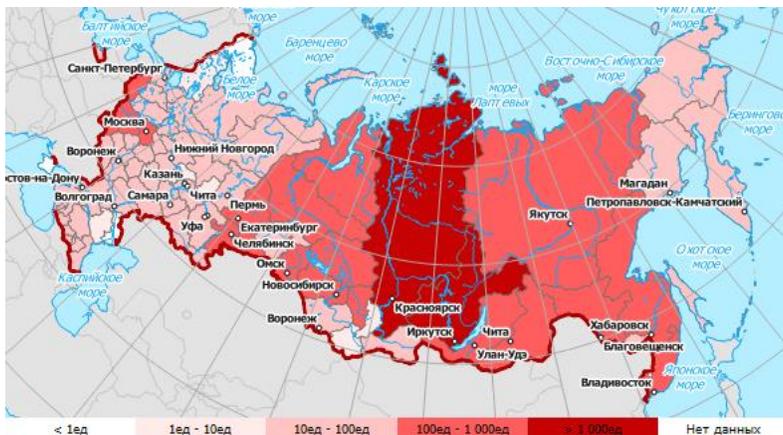


Рис. 10. Число пожаров, зафиксированных на территории России к 12.11.2016 г.

## Заключение

Выполненный анализ возникновения пожаров в тайге Красноярского края и их связи с неблагоприятными метеорологическими условиями показал, что из восьми предполагаемых гипотез однозначной взаимосвязи возникновения пожаров и гидрометеорологической обстановки не выявлено.

Только в 2000 г быстрое разрастание пожаров (по 66 пожаров за сутки в течение 5 суток) можно с натяжкой объяснить сильным ветром (3—6 м/с), хотя ветер с такой скоростью отмечался в 2003 и 2004 годах при скорости нарастания по 42 пожара в сутки и в 2006 г. при скорости нарастания по 22 пожара в сутки. Надо полагать, что в указанные годы пожары возникали за счет антропогенного фактора, влияние которого трудно выявить, и (или) выбросов метана и других сопутствующих газов, а затем распространялись под влиянием сильного ветра.

Наиболее определенно подтверждается гипотеза о прекращении быстрого разрастания пожаров при начале дождей и ослаблении ветра. Это подтверждает идею о том, что целесообразно привлекать авиацию

для искусственного вызывания осадков с целью тушения пожаров и их предупреждения при возникновении 3-его и тем более 4-го и 5-го класса пожароопасности. Для снижения их класса целесообразно также создавать облачность верхнего и среднего ярусов с целью снижения максимальных температур воздуха и подстилающей поверхности в полуденные и послеполуденные часы за счет ослабления солнечной радиации.

Хотя пожароопасная обстановка складывается при дефиците осадков, связь между отрицательными аномалиями осадков и количеством пожаров не прослеживается. Так, в 2003, 2011 и 2012 годах, когда количество осадков в летний период превышало норму (среднее многолетнее) было зафиксировано аномально высокое количество пожаров (см. табл. 2).

Засушливые годы и засухи только увеличивают интенсивность пожаров, но не способствуют их возникновению, так как засухи наблюдаются 3—4 раза за десятилетие, а пожары разной интенсивности в тайге возникают ежегодно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алисов Б. П.* (1956). Климат СССР — М.: изд-во МГУ. 126 с.
- Ваганов Е. А., Фуряев В. В., Сухинин А. И.* (1998). Пожары сибирской тайги // Природа. № 7. С.51—62.
- Валендик Э. Н.* (1990). Борьба с крупными лесными пожарами — Новосибирск: «Наука» СО. 193 с.
- Доронин А. П., Мазуров Г. И., Козлова Н. А., Фролов К. О.* (2016). К вопросу о классификации туманов. / В сб.: Материалы IV Всероссийской научной конференции "Проблемы прикладной геофизики и контроля природной среды". Под общей редакцией д.т.н. проф. Ю. В. Кулешова. — СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского. С. 48—51.
- Иванова Г. А.* (2005). Зонально - экологические особенности лесных пожаров в сосняках Средней Сибири. — Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. Красноярск.
- Козлов В. Н.* (2011). Методы искусственного вызывания осадков для борьбы с лесными пожарами. —СПб: Изд. Инфо-да. 202 с.

Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы (2004) / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов; под общей ред. Ю. Л. Воробьева. — М.: ДЭКС-ПРЕСС. 312 с.

*Мазуров Г. И., Акселевич В. И.* (2016). Основные результаты лабораторных и натуральных экспериментов по созданию искусственных облачных образований. / В сб.: Тезисы X Международной конференции "Естественные и антропогенные аэрозоли" — СПб: СПбУКП. 65 с.

*Мазуров Г. И.* (2016). Возможные причины катастрофы Ил-76 при тушении лесного пожара 1 июля 2016 года в Иркутской области // «Метеоспектр» № 3. С. 142—145.

*Мазуров Г. И., Григорьева И. Н.* (2016). Возможности предотвращения весенних заморозков // "Метеоспектр" № 1. С. 46—50.

*Мелехов И. С.* (1946). Сезоны лесных пожаров и построение географической схемы лесопожарных поясов // Сборник научно-исслед. Работ — Архангельск: АЛТИ. Т. 8. С. 1—15.

*Мокеев Г. А.* (1965). Влияние природных и экономических условий на горимость лесов и охрану их от пожаров / В сб.: Современные вопросы охраны лесов от пожаров. — М.: Лесная промышленность. С. 26—37.

*Одинцов Д. И.* (1946). Охрана леса // Лесное хозяйство. № 3. С. 2—4.

*Панченко Е. М.* (2015). Оценка климатической предрасположенности Обь-Томского междуречья к возникновению лесных пожаров. / В сб. Климатология и гляциология Сибири. — Томск: ИМКЭС СО РАН. С. 177—179.

Справочник по опасным природным явлениям в республиках, краях и областях Российской Федерации (1997). — СПб: Гидрометеоздат. 590 с.

*Сухинин А. И.* (2001). Региональный спутниковый мониторинг лесных пожаров в Восточной Сибири // Лесоведение. № 5. С. 24—31.

*Ульбаев Т. С., Базаева М. Г., Мансуров Г. Н., Юносов Х. Б.* (2013) О возможных причинах самовозгорания торфа. / Вестник Московского государственного областного университета. Серия естественные науки. № 1. С. 48—55.

Энциклопедия климатических ресурсов РФ (2005) / под редакцией Н. В. Кобышевой, К. Ш. Хайрулина — СПб: Гидрометеоздат. 232 с.

*Conard S. G., Ivanova G. A.* (1997). Wildfire in Russian boreal forests Potential impacts of fire regime characteristics on emission and global carbon balance estimates // Environ. Pollut. 98:305—313.

<http://meteo.ru/data/158-total-precipitation>

**ПРОВЕРКА МОДЕЛИ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА  
В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ  
(ГОСТ 26352-84) НА ОСНОВЕ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

*М. А. Березина<sup>1</sup>, О. В. Волобуева<sup>1</sup>, Я. В. Дробжшева<sup>1</sup>,  
В. И. Дробжсев<sup>2</sup>, А. И. Угрюмов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет  
192007 г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79  
e-mail: ydrobzheva@mail.ru  
e-mail: ovvolobueva@rshu.ru  
e-mail: ugriumov-met@mail.ru

<sup>2</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
e-mail: viktor-drobzhev@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.07.2017  
Поступила после доработки 25.08.2017

### **Введение**

С развитием новейших радиотехнических систем, например, спутниковой радионавигации, резко возрос интерес к параметрам ионосферы и тропосферы, влияющим на характеристики распространения радиоволн, и соответственно, влияющим на точностные характеристики радиосистем, например на точность определения координат с помощью спутниковой радионавигационной системы. Известно, что на характеристики распространения радиоволн в тропосфере оказывают влияние профили давления, температуры и влажности по пути распространения радиолуча. Как правило, существующая мировая сеть аэрологических станций (использующая радиозонды для получения вертикальных профилей основных параметров атмосферы), наземные радиометрические станции, (позволяющие определять характеристики влажности над

континентами), спутниковые радиометрические методы (позволяющие определять характеристики влажности над морской поверхностью) или радиозатменный метод (позволяющий определять профили давления, температуры и влажности) не могут в непрерывном режиме обеспечить получение данных для произвольной траектории радиоволны. В этой связи особое значение приобретают модели тропосферы, позволяющие заменить реальные значения параметров тропосферы (например, профилей давления, температуры и влажности) на их модельные значения. Для этих целей Международным союзом электросвязи (Рекомендация МСЭ-RP.835 от 2012 г.) разработаны и предложены выражения и данные для эталонных стандартных атмосфер, требуемые для расчета ослабления в атмосферных газах на трассах Земля-космос, включающие модели давления, температуры и влажности. Их предлагается использовать в тех случаях, когда более надежные, полученные на месте данные, отсутствуют.

В Советском Союзе был разработан ГОСТ 26352-84, определяющий модель влажности воздуха в Северном полушарии, в который периодически вносились изменения (последнее в 2017 году). Однако данные изменения не затрагивали такой параметр влажности, как массовая доля влаги.

Цель настоящей работы состоит в оценке адекватности профилей массовой доли влаги, установленных в ГОСТе, экспериментальным данным, полученным через 25 лет после его разработки.

## **1. Оценка адекватности модельных высотных профилей массовой доли влаги на основе экспериментальных данных**

Модель влажности воздуха в Северном полушарии (1984) устанавливает закономерности вертикального распределения характеристик влажности воздуха по широтным и меридиональным разрезам Северного полушария для высот от уровня моря до 10 км. Модель оформлена как государственный стандарт — ГОСТ 26352-84, который введен в действие с 1 января 1986 года.

Стандарт предназначен для оценки летно-технических

характеристик проектируемых и находящихся в эксплуатации летательных аппаратов, для использования при изучении метеорологических процессов и при решении задач, в которых требуются числовые оценки характеристик влажности воздуха.

Влажность воздуха в стандарте представлена следующими характеристиками: массовая доля влаги — отношение массы влаги к массе влажного вещества ( $q$ , г/кг); парциальное давление водяного пара — давление, которое имел бы водяной пар, находящийся в газовой смеси, если бы он занимал объем, равный объему смеси при той же температуре ( $e$ , гПа); точка росы — температура, при которой водяной пар во влажном газе, охлаждаемом изобарически, становится насыщенным ( $t$ , °C); относительная влажность — отношение парциального давления водяного пара к давлению насыщенного пара при одних и тех же давлении и температуре ( $U$ , %). Характеристики влажности воздуха, принятые в стандарте, соответствуют международному стандарту ИСО5878/Д-2.

В модели осредненные профили влажности для широт: 10°, 30°, 50° и 70° даны для четырех меридианов: 0°, 80°, 180° и 280° в. д. Выбор меридианов в модели ГОСТ 26352-84 не случаен, он в наилучшей степени отражает экстремальные отклонения влажности в волновых возмущениях. Таким образом, в отличие от других моделей учитывается не только зональное уменьшение влажности от экватора к полюсу, но и влияние крупномасштабных неоднородностей подстилающей поверхности.

Для примера на рис. 1 и 2 представлены высотные профили для января и июля. Из рисунков видно, что значения массовой доли влаги для конкретной широты вдоль различных меридианов, особенно в январе, могут существенно отличаться от среднего значения по долготе. Различие обусловлено главным образом различными типами подстилающей поверхности (суша, море), с которой происходит испарение влаги.

Из-за неоднородности подстилающей поверхности на фоне сравнительно плавного убывания влажности от экватора к полюсу имеются крупномасштабные волнообразные возмущения с относительно высокими значениями влажности над акваториями

морей и океанов и относительно низкими — над территориями материков.

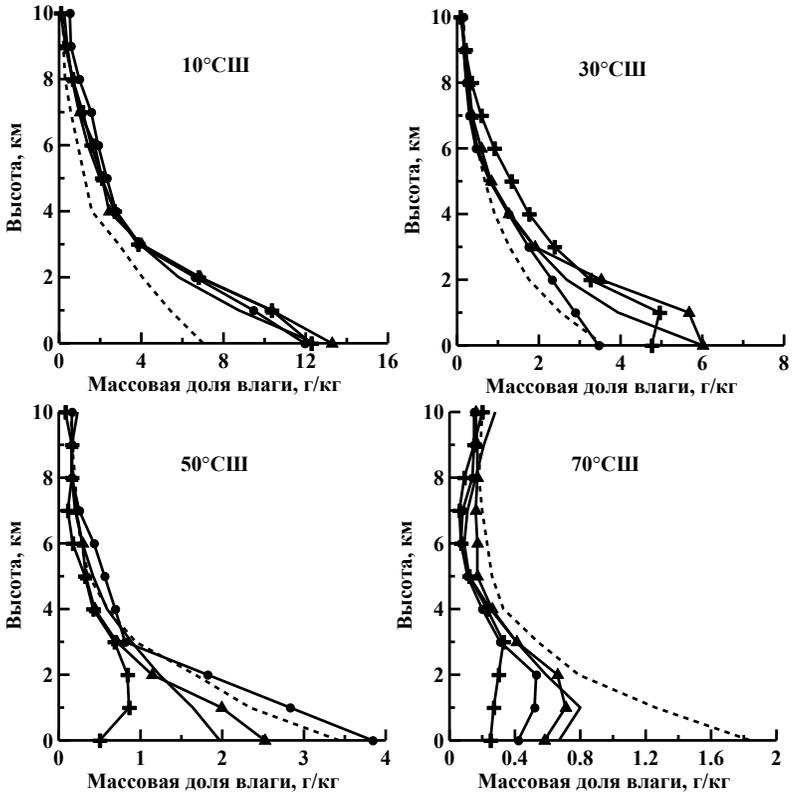


Рис. 1. Вертикальные распределения влажности для января для различных широт и долгот Северного полушария по модели ГОСТ 26352-84. Штриховая линия – профили для 0° в. д., точки – профили для 80° в. д., треугольники – профили для 180° в. д., крестики – профили для 280° в. д., сплошная линия – осредненный профиль по долготе.

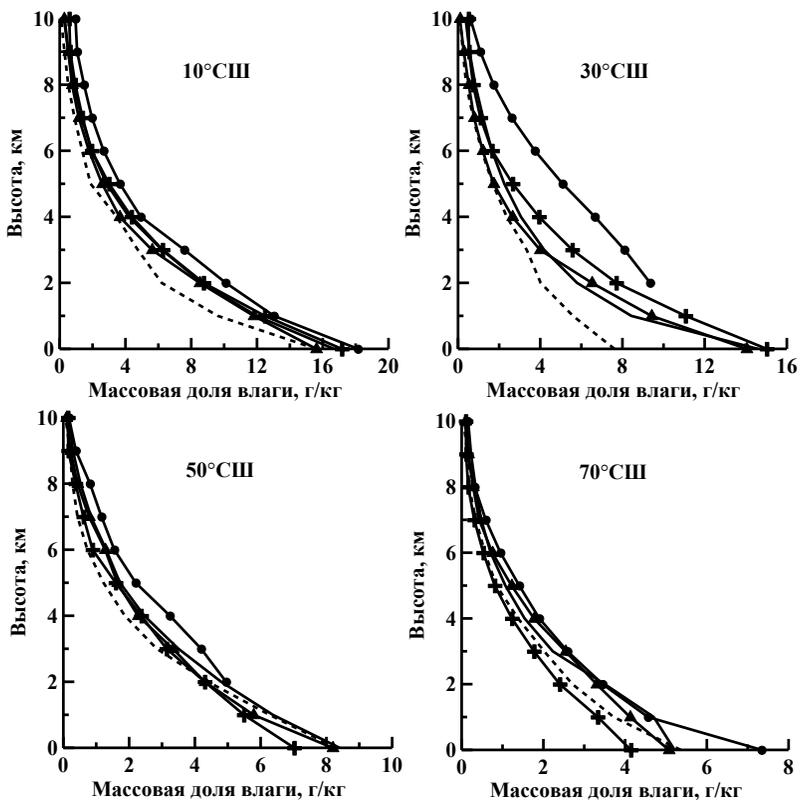


Рис. 2. Вертикальные распределения влажности для июля для различных широт и долгот Северного полушария по модели ГОСТ 26352-84.

Штриховая линия – профили для 0° в. д., точки – профили для 80° в. д., треугольники – профили для 180° в. д., крестики – профили для 280° в. д., сплошная линия – осредненный профиль по долготе.

Оценка ошибок модельных высотных профилей массовой доли влаги проводилась на основе экспериментальных данных, полученных на аэрологических станциях, расположенных вдоль меридианов 0°, 80° в. д. и 180°, 80° з. д. вблизи 10°, 30°, 50°, 70° с. ш. для января, июля 2011—2013 гг. и 12 UTC.

С помощью разработанных компьютерных программ на основе экспериментальных значений давления и точки росы для различных высот тропосферы были получены высотные профили массовой доли влаги с помощью формул:

$$\tau = \frac{237,3 \log \frac{e}{6,1070}}{7,5 - \log \frac{e}{6,1070}}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — точка росы, °С,  
 $e$  — парциальное давление водяного пара, гПа;

$$e = \frac{q}{621,98 + 0,378q} \times p, \quad (2)$$

где  $q$  — массовая доля влаги, г/кг;  
 $p$  — давление воздуха, гПа.

Данные профили массовой доли влаги, полученные за каждый день января и июля, осреднялись. Средние за месяц профили сопоставлялись с соответствующими модельными профилями.

Расчет средней ошибки модельного высотного профиля массовой доли влаги проводился по следующей формуле

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N (q_{im} - q_{iex})}{N}, \quad (3)$$

где  $q_m$  — модельные значения влажности,  
 $q_{ex}$  — экспериментальные значения влажности,  
 $N$  — количество равноотстоящих отсчетов для дискретных данных влажности, в нашем случае значения влажности для высот от 0 до 10 км с шагом 1 км.

Расчет среднеквадратичного отклонения проводился по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (q_{im} - q_{iex})^2}{N-1}}, \quad (4)$$

где  $q_m$  — модельные значения влажности,  
 $q_{ex}$  — экспериментальные значения влажности,  
 $N$  — количество равноотстоящих отсчетов для дискретных данных влажности.

Рассчитанные среднеквадратические отклонения позволяют оценить доверительные интервалы высотных профилей средних значений по формуле:

$$I_\beta = (m - \varepsilon_\beta; m + \varepsilon_\beta), \quad (5)$$

где  $m$  — среднее значение,  $\varepsilon_\beta = t_\beta \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}$ ,  
 $n$  — число независимых измерений.

$$t_\beta = \text{arg} \Phi\left(\frac{1+\beta}{2}\right), \quad (6)$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt \quad (7)$$

$\Phi(x)$  — интеграл вероятностей для нормально распределенной случайной величины.

$\beta$  — задаваемая в опыте величина вероятности.

В данном случае мы предполагаем, определить доверительные интервалы для средних значений с вероятностью  $\beta = 0,95$ .

Возможность использования нормального закона распределения случайной величины (в нашем случае  $m$ ) определяется обычно следующими соображениями. Величина  $m$  представляет собой сумму  $n$  — независимых одинаково распределенных случайных величин  $x_i$  (в нашем случае величины массовой доли влаги). Согласно центральной предельной теореме большинство встречающихся на практике случайных величин, таких, например, как ошибки измерений, могут быть представлены как суммы весьма большого

числа сравнительно малых слагаемых — элементарных ошибок, каждая из которых вызвана действием отдельной причины, не зависящей от остальных. Каким бы законам распределения ни были подчинены отдельные элементарные ошибки, особенности этих распределений в сумме большого числа слагаемых нивелируются, и сумма оказывается подчиненной закону, близкому к нормальному. На практике, даже при относительно небольшом числе слагаемых (порядка 10...20), закон распределения суммы можно приближенно считать нормальным.

Значение  $t_{\beta}$  в зависимости от  $\beta$  представлены в специальной табл. 5 (Вентцель, 2010). В нашем случае осреднение проводилось по числу дней в месяце. Для значения  $n = 31$  и  $\beta = 0,95$  из таблицы имеем  $t_{\beta} = 2,04$ .

### **1.1 Оценка ошибок модельных высотных профилей массовой доли влаги для восточных долгот Северного полушария**

Для проведения исследований использовались экспериментальные данные, полученные на станциях (табл. 1), расположенных вдоль меридианов  $0^{\circ}$ ,  $80^{\circ}$  в. д. и вблизи  $10^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$ ,  $70^{\circ}$  с. ш. для января, июля 2011—2013 гг. и 12 UTC, а именно, Абиджан (Кот-д’Ивуар); Айн-Салах, (Алжир); Траппе (Франция); Торсхавн (Дания); Хамбантота (Шри-Ланка); New Delhi Safdarjung (Индия); Павлодар (Казахстан); Туруханск (Россия) ([http://www. weather.uwo.edu](http://www.weather.uwo.edu)).

Результаты совместного анализа модельных и экспериментальных высотных профилей массовой доли влаги для станции Абиджан за июль и январь (12 UTC) для 2011, 2012 и 2013 гг. представлены на рис. 3.

Для обоих месяцев модель адекватна эксперименту. Для января вблизи земли экспериментальная величина  $q$  превышает модельную практически в 3 раза. Что касается экспериментальных профилей массовой доли влаги, то с 2011 по 2013 гг. с вероятностью 95 % они не менялись. Возможно, несовпадение эксперимента и модели для обоих

месяцев связано с тем, что модельный профиль брался для широты  $10^\circ$  с. ш., а станция расположена на широте  $5,25^\circ$  с. ш.

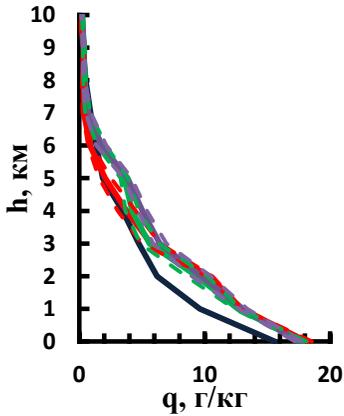
*Таблица 1*

**Климатическое описание станций для оценки адекватности  
модели ГОСТ 26352-84 для восточных долгот**

Станция	Климат
<p>Абиджан, Кот-д'Ивуар (<math>5,25^\circ</math> с. ш., <math>3,93^\circ</math> з. д., высота над уровнем моря 8 м)</p>	<p>Субэкваториальный с двумя влажными (апрель-июль, октябрь-ноябрь) и двумя сухими (декабрь-апрель, август-сентябрь) сезонами. Осадки в среднем 2000 мм/год. Самый сухой месяц — январь (40 мм осадков), самый влажный — июнь (500 мм). Среднегодовая температура <math>+27^\circ\text{C}</math>, самый холодный месяц — август (<math>+25^\circ\text{C}</math>), в марте температура возрастает до <math>+28^\circ\text{C}</math>.</p>
<p>Айн-Салах, Алжир (<math>27,23^\circ</math> с. ш. <math>2,50^\circ</math> в. д., высота над уровнем моря 269 м)</p>	<p>Климат тропический пустынный. Осадки в среднем ниже двух сантиметров в год. Колебания температур в течение года: от <math>-5</math> зимой до <math>+50</math> летом.</p>
<p>Траппе, Франция (<math>48,8^\circ</math> с. ш., <math>2,0^\circ</math> в. д. высота над уровнем моря 168 м)</p>	<p>Климат умеренный, среднегодовое количество осадков 650 мм. Преобладают западные и юго-западные ветра. Самые холодные месяцы — декабрь и январь, самые теплые — июль и август.</p>
<p>Торсхавн, Дания (<math>62,01^\circ</math> с. ш., <math>6,76^\circ</math> з. д., высота над уровнем моря 56 м)</p>	<p>Климат субарктический океанический, годовая амплитуда температуры мала (<math>7^\circ</math>) и очень большим количеством осадков. Самый облачный населенный пункт в мире, в средняя продолжительность солнечного сияния 841 ч в год (2,4 ч в день), что в два раза меньше, чем в Москве.</p>

Станция	Климат
Хамбантота, Шри-Ланка (6,1° с. ш., 81,1° в. д., высота над уровнем м. 20 м)	Климат экваториальный. Самым жарким месяцем является апрель, когда дневные температуры достигают +32..+34 °С, самым прохладным — декабрь +28..+30 °С. В ночные часы температура воздуха не опускается ниже +19 °С.
Нью Дели, Индия (28,6° с. ш., 77,2° в. д., высота над уровнем моря 216 м)	Климат континентальный, полуаридный с большой разницей между температурами зимой (до 4°С) и летом (до 40°С). Лето длится с апреля по октябрь, с сезоном муссонов посередине. Среднегодовая температура 25°С, среднемесячные температуры от 14 до 33 °С. В среднем в год выпадает осадков 714 мм, максимальное количество — в июле и августе (период муссонов).
Павлодар, Казахстан (52,3° с. ш., 76,93° в. д., высота над уровнем моря 122 м)	Климат умеренный, резко континентальный. Длительная суровая зима с устойчивым снежным покровом и жаркое лето с небольшим количеством осадков. Средняя температура января –5,8°С, июля +21,5°С. Среднегодовое количество осадков 303 мм. Среднегодовая температура воздуха +3,3°С. Относительная влажность воздуха 69 %.
Туруханск, Россия (65,8° с. ш., 87,9° в. д., высота над уровнем моря 38 м)	Климат резко континентальный, субарктический. Средняя температура июля 16,5 °С, января –25,4 °С, морозы достигают –57 °С. Среднее годовое количество осадков 598 мм. Среднегодовая температура — отрицательная, низкие зимние температуры и небольшая толщина снежного покрова в первой половине зимы обуславливают широкое распространение вечной мерзлоты, мощность которой достигает 50—200 м.

а)



б)

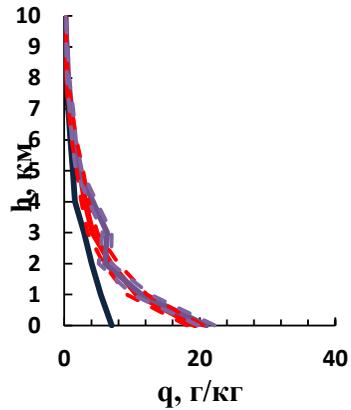


Рис. 3. Модельный профиль и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Абиджан за июль 2011, 2012, 2013 гг. (а) и январь 2011, 2013 гг. (б).

Красные линии – 2011 г., зелёные линии – 2012 г., сиреневые линии – 2013 г., тёмно-синяя линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

Расчитанные для обоих месяцев средние по высотному профилю ошибки модели и их среднеквадратические отклонения представлены в табл. 2.

Следует отметить, что средние по высоте ошибки модельного профиля по сравнению с экспериментальными увеличились к 2013 г. так же, как и их среднеквадратичные отклонения.

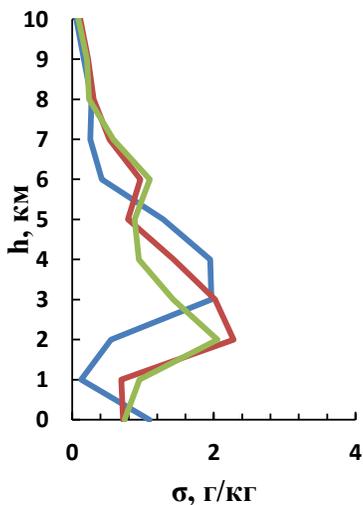
Для примера, для данной станции представлены высотные профили среднеквадратического отклонения экспериментальных высотных профилей для каждого года за июль и январь (рис. 4).

Таблица 2

Средние по высоте ошибки модельного профиля по сравнению с экспериментальными и среднеквадратичные отклонения ошибок для июля и января 2011—2013 гг., 12 UTC, станции Абиджан

Год, месяц	2011	2012	2013	2011	2012	2013
	июль			январь		
Средняя ошибка профиля (м, г/кг)	-1,46	-1,61	-1,82	-2,68	-	-3,15
Среднее квадратическое отклонение (σ, г/кг)	1,63	1,27	1,40	3,57	-	4,07

а)



б)

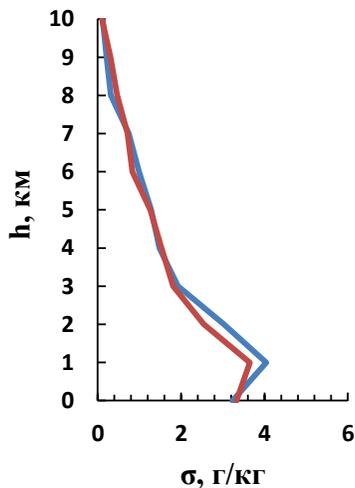


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение экспериментальных высотных профилей массовой доли влаги для 12 UTC на станции Абиджан за июль 2011, 2012, 2013 гг. (а) и январь 2011, 2013 гг. (б).

Красные линии – 2011 г., зелёные линии – 2012 г., сиреневые линии – 2013 г., тёмно-синяя линия – данные по модели ГОСТ 26352-84.

На рис. 5 представлены модельный профиль и осредненные за месяц экспериментальные высотные профили массовой доли влаги за июль и январь (12 UTC) для станции Айн-Салах. Из рисунка видно, что массовая доля влаги ( $q$  г/кг) уменьшается с высотой, причем экспериментальные данные у подстилающей поверхности (0 км) значительно отличаются от данных модели, для которой это значение составляет около 15 г/кг. Однако начиная с 2 км, различия между кривыми существенно уменьшаются (кривые сближаются). Низкие значения массовой доли влаги у подстилающей поверхности наблюдаются из-за того, что данная станция находится вблизи пустыни Сахара. При этом величина средней по высоте ошибки модельного профиля, по сравнению с экспериментальными, уменьшилась к 2013 году так же, как и среднеквадратичные отклонения.

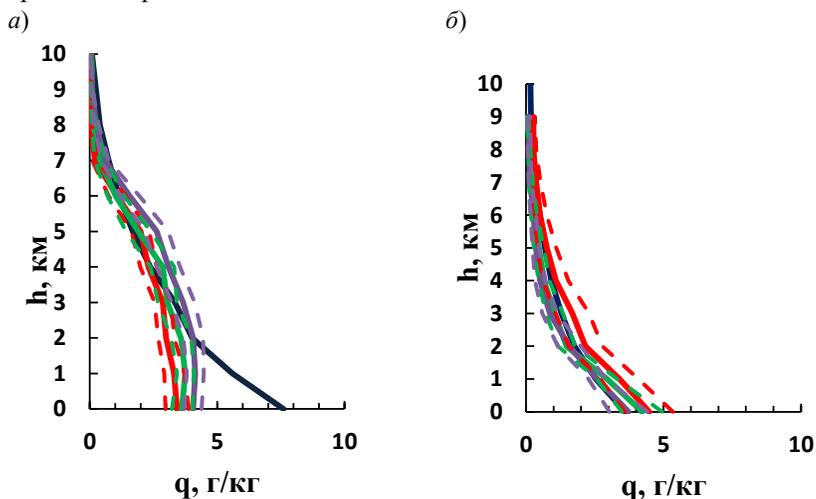


Рис. 5. Модельный профиль и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Айн-Салах 2011, 2012, 2013 гг. за июль (а) и январь (б).

Красные линии – 2011 г., зелёные линии – 2012 г., сиреневые линии – 2013 г., тёмно-синяя линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

В январе модельные профили адекватно отражают реальную ситуацию. При этом экспериментальные профили, как для июля, так и для января за 2011, 2012 и 2013 годы практически повторяют друг друга.

Величина средней по высоте ошибки модельного профиля, по сравнению с экспериментальными, для января увеличилась к 2013 году (табл. 3) так же, как и среднеквадратичные отклонения, в июле наблюдается противоположная тенденция.

Таблица 3

**Средние по высоте ошибки модельного профиля по сравнению с экспериментальными и среднеквадратичные отклонения ошибок для июля и января 2011—2013 гг., 12 UTC, станции Айн-Салах**

Год, месяц	2011	2012	2013	2011	2012	2013
	<i>июль</i>			<i>январь</i>		
Средняя ошибка профиля (м, г /кг)	0,42	0,22	-0,11	0,30	0,65	0,77
Среднее квадратическое отклонение (б, г /кг )	1,25	1,19	1,18	0,49	0,57	0,70

Совместный анализ экспериментальных и модельных профилей массовой доли влаги для станции Траппе (48,8° с. ш., 2,0° в. д.) для 2011, 2012 и 2013 гг. (12 UTC) показал, что с вероятностью 95 % можно предполагать, что высотные профили  $q(h)$  за данные годы практически не менялись как для июля, так и для января (рис. 6). Видно, что для июля модель адекватна эксперименту по всему высотному профилю.

Однако для января экспериментальные профили отличаются от модельного, особенно на высотах до 2 км. В январе значения экспериментальных профилей больше, чем модельных практически на всех высотах. Увеличение  $q$  в 2013 году на высота от 0 до 1 км возможно связано с инверсией температуры, так как при более

высокой температуре воздух способен содержать больше водяного пара, чем при низкой.

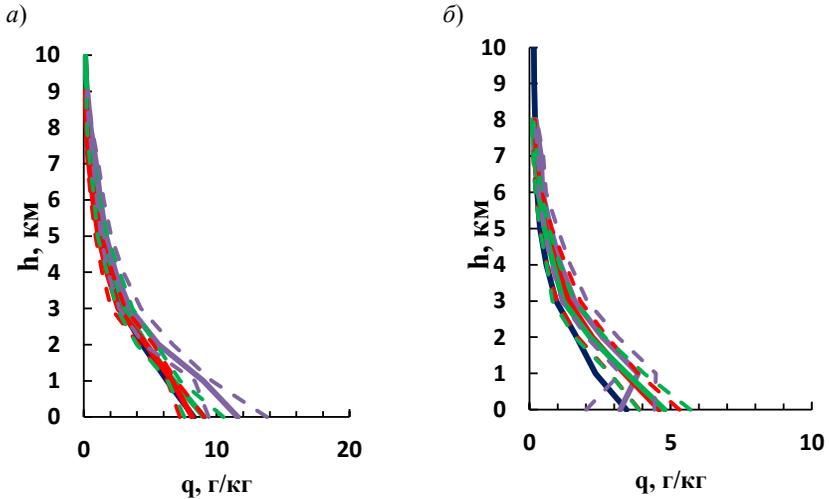


Рис. 6. Модельный профиль и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Траппе 2011, 2012, 2013 гг. за июль (а) и январь (б).

Красные линии – 2011 г., зелёные линии – 2012 г., сиреневые линии – 2013 г., тёмно-синяя линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

При этом для января величина средней по высоте ошибки (m) модельного профиля по сравнению с экспериментальными, а также ее среднеквадратическое отклонение (б) увеличились к 2013 году. Для июля m уменьшилась к 2013 году, а среднеквадратическое отклонение увеличилось (табл. 4).

Для июля сопоставление модели и эксперимента для станции Торсхавн (62,01° с. ш. 6,76° з. д.) (рис. 7) показало, что кривые q модели и экспериментальных данных за 2011 и 2012 годы практически совпадают.

Таблица 4

Средние по высоте ошибки модельного профиля по сравнению с экспериментальными и среднеквадратичные отклонения ошибок для июля и января 2011—2013 гг., 12 UTC, станции Траппе

Год, месяц	2011	2012	2013	2011	2012	2013
	июль			январь		
Средняя ошибка профиля (м, г/кг)	0,38	0,08	-0,65	-0,71	-0,69	0,75
Среднее квадратическое отклонение (б, г/кг)	0,35	0,33	1,23	0,92	1,0	0,71

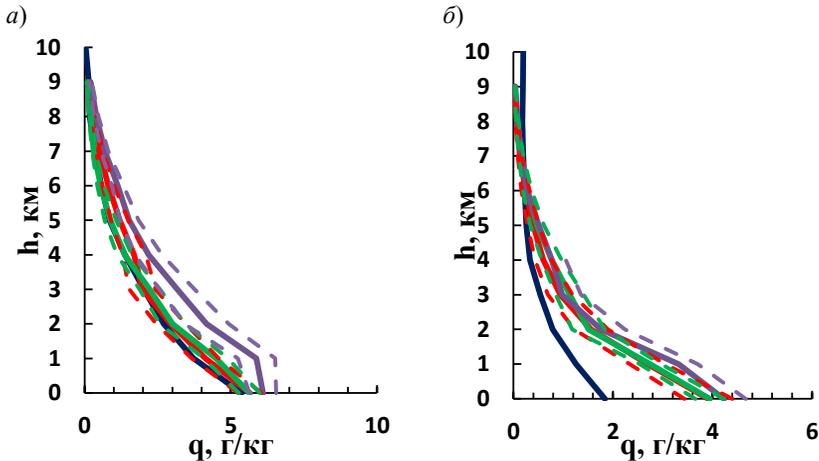


Рис. 7. Модельный профиль и экспериментальные усредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Торсхавн 2011, 2012, 2013 за июль (а) и январь (б).

Красные линии – 2011 г., зеленые линии – 2012 г., сиреневые линии – 2013 г., темно-синяя линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

В целом осредненные высотные профили влажности за три года практически не менялись, за исключением высотной области 0—4 км, где наблюдается превышение значений массовой доли влаги в 2013 году по сравнению с 2011 и 2012 годами. Выше 4 км модель и экспериментальные данные за три года на данной станции достаточно хорошо совпадают.

Для января модельный высотный профиль  $q$  по всей высотной области довольно существенно отличается от экспериментальных осредненных для 3-х лет, в то время как сами экспериментальные профили за 2011, 2012 и 2013 года практически повторяют друг друга.

При этом, как для июля, так и для января величина средней по высоте ошибки модельного профиля и среднеквадратического отклонения к 2013 году увеличилась по сравнению с экспериментальными (табл. 5).

Таблица 5

**Средние по высоте ошибки модельного профиля по сравнению с экспериментальными и среднеквадратичные отклонения ошибок для июля и января 2011—2013 гг., 12 UTC, станции Торсхавн**

Год, месяц	2011	2012	2013	2011	2012	2013
	<i>июль</i>			<i>январь</i>		
Средняя ошибка профиля (м, г /кг)	0,07	0,12	-0,54	-0,72	-0,77	0,87
Среднее квадратическое отклонение (б, г /кг)	0,32	0,23	1,39	1,08	1,08	1,23

Далее были исследованы модельные и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для долготы, близкой к 80° в. д. К сожалению, не удалось найти данные для широты близкой к 0° с. ш., как это делалось для долготы 0° в. д. Совместный анализ модельного и экспериментального высотных

профилей влажности для станции Нью-Дели ( $28,6^\circ$  с. ш.  $77,2^\circ$  в. д.), расположенной вблизи  $30^\circ$  с. ш. и  $80^\circ$  в. д., проводился только для июля 2011 года (12 UTC) из-за отсутствия экспериментальных данных и показал, что модель неплохо работает, начиная с высоты 4 км. При этом средняя ошибка профиля ( $m$ ) составила  $3,11$  г /кг, а среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) —  $2,46$  г /кг.

Далее анализ работоспособности модели проводился для станции с координатами, близкими к  $50^\circ$  с. ш. и  $80^\circ$  в. д.

На рисунке 8 представлены модельный профиль и осреднённые за месяц для 2011, 2012 и 2013 гг. экспериментальные высотные профили массовой доли влаги за июль (12 UTC) для станции Павлодар ( $52,3^\circ$  с. ш,  $76,93^\circ$  в. д.).

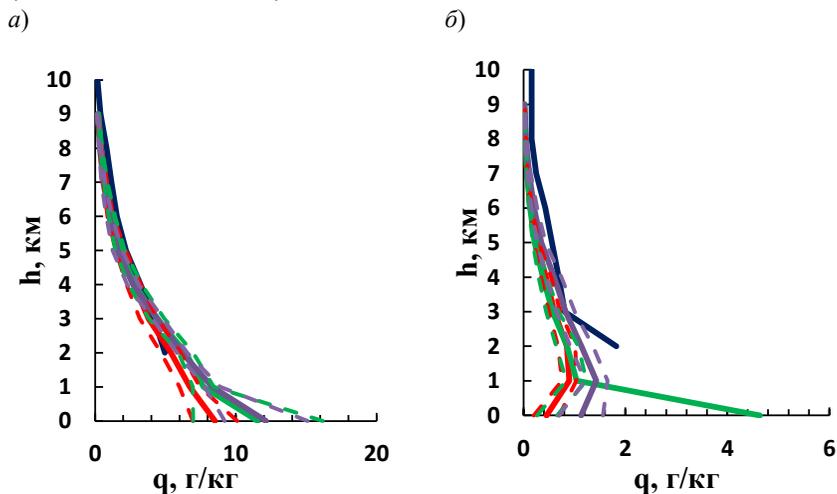


Рис. 8. Модельный профиль и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Павлодар за июль (а) и январь (б) 2011, 2012, 2013 гг.

Красные линии – 2011 г., зелёные линии – 2012 г., сиреневые линии – 2013 г., тёмно-синяя линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

Для июля и января с вероятностью 95 % можно предполагать, что высотные профили  $q$  за данные годы не менялись. В целом, в июле модель адекватна эксперименту по всей высотной области. Надо отметить, что в январе вблизи земли экспериментальная величина  $q$  за 2013 год превышает значения 2012-го года практически в 3 раза, а значения массовой доли влаги отличаются друг от друга в 9 раз. Модель адекватна эксперименту для января, начиная с 3 км.

Низкие значения массовой доли влаги наблюдаются из-за того, что данная станция находится в области резко континентального климата. Зима там длительная и суровая с устойчивым снежным покровом, а среднегодовое количество осадков — 303 мм.

При этом, для июля величина средней по высоте ошибки и среднеквадратического отклонения к 2013 году увеличилась по сравнению с экспериментальными, а для января, наоборот, уменьшилась (табл. 6).

Таблица 6

**Средние по высоте ошибки модельного профиля по сравнению с экспериментальными и среднеквадратичные отклонения ошибок для июля и января 2011—2013 гг., 12 UTC, станции Павлодар**

Год, месяц	2011	2012	2013	2011	2012	2013
	<i>июль</i>			<i>январь</i>		
Средняя ошибка профиля (м, г /кг)	-0,12	-0,71	-0,73	0,38	0,38	0,17
Среднее квадратическое отклонение (б, г /кг)	0,26	1,08	1,32	0,44	0,42	0,24

На рисунке 9 представлены модельный и экспериментальные высотные профили для станции Туруханск (65,8° с. ш., 87,9° в. д.) за июль для 2011, 2012 и 2013 гг.

Анализ доверительных интервалов показывает, что в июле в области от 0 до 4 км значения высотных профилей влажности за 2012

и 2013 года больше, чем за тот же месяц 2011 года, т. е. влажность в данной области высот увеличилась. Модель наилучшим образом совпадает с высотным профилем за 2011 год, а выше 4 км для всех экспериментальных профилей. В январе высотные профили массовой доли влаги за три года практически не менялись. Однако для всех трех лет видна особенность: увеличение влажности от 0 до 1 км (обычно она уменьшается с высотой). Возможно, это связано с инверсией температуры. Следует отметить, что модель отражает данную особенность, однако для января по всей области высот видно превышение значений высотного профиля  $q$  по сравнению со значениями модельного.

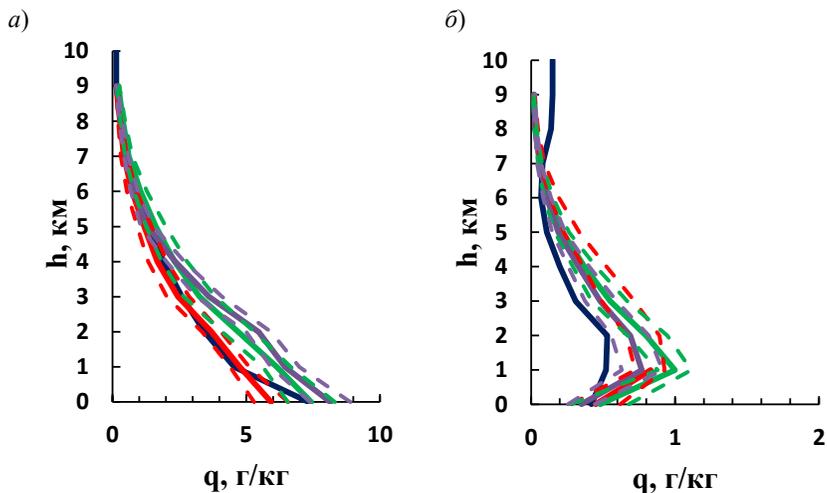


Рис. 9. Модельный профиль и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Туруханск 2011, 2012, 2013 гг. за июль (а) и январь (б).

Красные линии – 2011 г., зелёные линии – 2012 г., сиреневые линии – 2013 г., тёмно-синяя линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

Низкие значения массовой доли влаги наблюдаются из-за того, что данная станция находится в области таежной зоны с резко континентальным субарктическим климатом. Средние температуры января  $-25,4^{\circ}\text{C}$ , морозы могут достигать значений  $-57^{\circ}\text{C}$ . В среднем за год выпадает около 598 мм осадков. Среднегодовая отрицательная температура, низкие зимние температуры и небольшая мощность снежного покрова в первой половине зимы обуславливают широкое распространение вечной мерзлоты, мощность которой в этом районе достигает 50—200 м. Она также влияет на показания массовой доли влаги.

При этом в июле значение  $m$ , как и  $B$  к 2013 году увеличилось. В январе значение  $m$  к 2013 году увеличилось, а значение  $B$  уменьшилось (табл. 7).

Таблица 7

**Средние по высоте ошибки модельного профиля по сравнению с экспериментальными и среднеквадратичные отклонения ошибок для июля и января 2011—2013 гг., 12 UTC, станции Туруханск**

Год, месяц	2011	2012	2013	2011	2012	2013
	<i>июль</i>			<i>январь</i>		
Средняя ошибка профиля ( $m$ , г /кг)	-0,12	-0,77	-0,91	0,38	0,38	0,17
Среднее квадратическое отклонение ( $B$ , г /кг )	0,23	0,71	1,05	0,44	0,42	0,24

## 1.2 Оценка ошибок модельных высотных профилей массовой доли влаги для западных долгот Северного полушария

Для оценки адекватности модели ГОСТ 26352-84 для западных долгот, а именно  $80^{\circ}$  и  $180^{\circ}$  з. д. и  $10^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$ ,  $70^{\circ}$  северных широт использовались данные 8-и станций (см. табл. 8).

**Климатическое описание станций для оценки адекватности модели ГОСТ 26352-84 для западных долгот**

Станция	Климат
<p>Corozal Observations, Панама (8,98° с. ш. 79,58° з. д., высота над уровнем моря 8 м).</p>	<p>Климат субэкваториальный, характерен продолжительный влажный сезон (с апреля по декабрь) и короткий сухой (с января по март), когда осадки выпадают крайне редко. Во влажном сезоне есть два максимума — в июне и октябре, в июле-августе наблюдается вторичный минимум, среднемесячная температура в течение года почти не меняется и составляет 26—28 °С. Среднемесячные максимумы температуры не опускаются ниже 32 °С, а в апреле поднимаются до 36 °С.</p>
<p>Charleston Observations Air Force base, Южная Каролина, США, (32,9° с. ш. 80,03° з. д., высота над уровнем моря 15 м).</p>	<p>Климат субтропический океанический. В течение 230 дней в году стоит солнечная погода. Весной средние температуры варьируются от 14 до 22°С. Лето жаркое с большим количеством осадков, среднесуточная температура июля 28,2 °С. 40 % годовых осадков выпадают летом, чаще в виде коротких ливней. Летом и осенью велика повторяемость ураганов. Осень и зима мягкие, среднесуточная температура ноября 14 °С, января 9,9 °С, снег выпадает редко. Дневные температуры зимой около 8—12 °С.</p>
<p>Moosonee Observations Онтрио, Канада (51,3° с. ш. 80,6° з. д., высота над уровнем моря 10 м).</p>	<p>Климат континентальный. Норма осадков в январе 49 мм, в июле — 74 мм. Средний максимум температур наблюдается в июле-августе и равен 20 °С. Средний минимум — в январе –26 °С.</p>

Станция	Климат
<p>Hall Beach Observations, Канада (68,76° с. ш. 81,21° з. д., высота над уровнем моря 6 м).</p>	<p>Климат арктический и субарктический. Территория представляет собой арктическую пустыню, расположена в зоне вечной мерзлоты. На побережье Гудзонова залива средние дневные температуры января достигают –30 °С, а июля 10 °С. Заметно холоднее на севере провинции и в районе Баффиновой земли, где средние температуры составляют –35 °С и 5 °С соответственно. Количество осадков мало (в среднем за год 200 мм и в основном в виде снега),</p>
<p>Majuro Observations, Marshall Islands (7,08° с. ш. 171,38° з. д., высота над уровнем моря 3 м).</p>	<p>На северных островах страны климат тропический, самый южный остров страны расположен в экваториальном поясе. Температурный режим в течение года остается постоянным, амплитуда годового хода составляет 1—2 °С. Среднегодовая температура на Маршалловых Островах составляет 27,8 °С. На северных островах ежегодно выпадает от 1000 до 1750 мм осадков, самые сильные дожди случаются с сентября по ноябрь, на южных островах осадки выпадают круглый год в количестве от 3000 до 4300 мм.</p>
<p>Lihue Observations Airport, США, Гавайи (21,98° с. ш., 159,35° з.д., высота над уровнем моря 32 м).</p>	<p>Климат тропический, морской. Среднегодовая сумма осадков составляет 937 мм. Количество осадков в январе — 95 мм, а в июле — 47 мм. Средняя температура на протяжении года около 23 °С.</p>

Станция	Климат
Shemya Afb Observations, США, Аляска (52,71° с. ш. 174,1° з. д., высота над уровнем моря 31 м).	Климат морской субарктический: средняя температура февраля –14 °С, августа 11,9 °С, среднее количество осадков в год 1500 мм, летом часты туманы.
Nome Observations, США, 64,5° с. ш. 165,43° з. д., высота над уровнем моря 7 м).	Климат субарктический. Только два месяца в году средняя температура превышает +10 °С, средняя температура февраля –15,6 °С, среднегодовая температура –3,2 °С. В год выпадает в среднем 386 мм осадков, летом в виде дождя, зимой в виде снега.

Совместный анализ модельных и экспериментальных высотных профилей массовой доли влаги для станции Согозал (8,98° с. ш. 79,58° з. д.), близкой к 10° с. ш. и 80° з. д. для июля и января 2011—2013 гг. показал, что с вероятностью 95 % высотные профили массовой доли влаги за рассмотренные три года не менялись. При этом в июле значения  $q$  превышают модельные в среднем на 2 г/кг по всему высотному профилю. А величины средних значений и среднеквадратичных отклонений оказались примерно одинаковыми по годам. В среднем по высоте влажность как в июле, так и в январе на станции Согозал по рассмотренным годам возросла по сравнению с моделью. В январе модель хорошо согласуется с экспериментом, начиная с высоты 3 км (табл. 9).

Результаты исследований для станции Charleston (32,90° с. ш. 80,03° з. д.) показали, что с вероятностью 95 % высотные профили массовой доли влаги за рассмотренные три года не менялись как для

июля, так и для января. Вместе с тем в июле хорошее совпадение с моделью наблюдается выше 3 км, а в январе по всем высотам.

Исследование адекватности модели влажности эксперименту для области 50° с. ш. и 80° з. д. вблизи станция Moosonee (51,3° с.ш. 80,6° з.д.) показало, что с 95 % вероятностью можно предполагать, что в июле профили  $q(h)$  за рассмотренные 2012 и 2013 года не менялись и модель адекватна эксперименту, начиная с 2 км. При этом в среднем по высоте влажность в июле на станции Moosonee по рассмотренным годам возросла по сравнению с моделью.

Для января из-за отсутствия экспериментальных данных анализ проводился лишь для 2013 года и показал хорошее совпадение модели и эксперимента для всех высот.

Таблица 9

**Средние по высоте ошибки модельного профиля по сравнению с экспериментальными и среднеквадратичные отклонения ошибок для июля и января 2011—2013 гг., 12 UTC, станции Corozal**

Год, месяц	2011	2012	2013	2011	2012	2013
	июль			январь		
Средняя ошибка профиля (м, г/кг)	-1,96	-1,76	-1,69	-1,73	-1,31	-1,48
Среднее квадратическое отклонение (Б, г/кг)	1,09	1,10	1,08	1,78	1,84	1,96

Сопоставление модели и эксперимента для станции Hall Beach (68,76° с. ш. 81,21° з. д.) представлено на рис. 10.

Видно, что с 95 % вероятностью можно предполагать, что для июля профили  $q(h)$  за 2011—2013 гг. не менялись и, начиная с 2 км, модель работает хорошо. При этом в среднем по высоте влажность в июле на станции Hall Beach по рассмотренным годам возросла по сравнению с моделью.

В январе на данной станции наблюдались значительные величины среднеквадратичных отклонений по отношению к средним значениям, что указывает на существенную изменчивость профилей влажности ото дня ко дню, особенно за 2011 год. Это обстоятельство определило и существенный «разброс» доверительных интервалов. Видно, что они, практически, включают профиль, построенный по эмпирической модели ГОСТ 26352-84 (за исключением небольшого участка кривой на высотах выше 7 км). Однако видно, что максимум влажности, наблюдавшийся для эксперимента, для модели смещен в сторону большей высоты атмосферы.

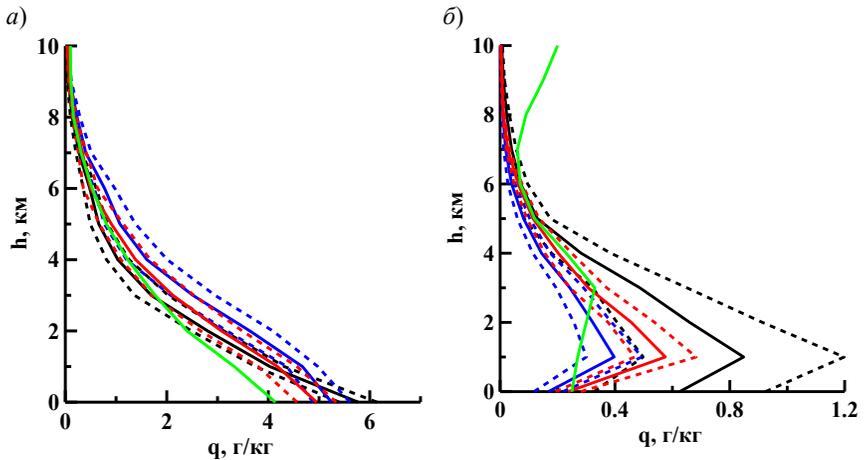


Рис. 10. Модельный профиль и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Hall Beach 2011, 2012, 2013 за июль (а) и январь (б).

Черные линии – данные за 2011 г., синие линии – данные за 2012 г., красные линии – данные за 2013 г., зеленая линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

Анализ модельных и экспериментальных данных для станции, близкой к  $10^{\circ}$ с. ш. и  $180^{\circ}$ з. д. — станция Marshall Islands ( $7,08^{\circ}$ с. ш.

171,38°з. д.) за 2011—2013 гг. показал, что в июле и январе с 95 % вероятностью профили  $q(h)$  за три года не менялись. При этом для июля модель плохо согласуется с экспериментом по всему высотному профилю, а для января неплохое согласие, начиная с 4 км. При этом, в среднем по высоте, влажность, как в июле, так и в январе на станции Marshall Islands по рассмотренным годам возросла по сравнению с моделью.

На рис. 11 представлены модельные и экспериментальные осредненные высотные профили массовой доли влаги за июль и 12 UTC для станции Lihue Airport (21,98° с. ш. 159,35° з. д.).

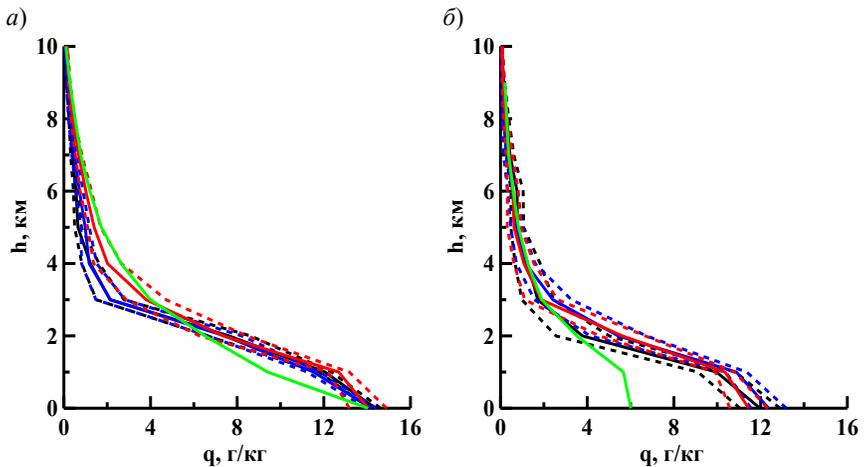


Рис. 11. Модельный профиль и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Lihue Airport 2011, 2012, 2013 за июль (а) и январь (б).

Черные линии – данные за 2011 г., синие линии – данные за 2012 г., красные линии – данные за 2013 г., зеленая линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

Для июля и января с 95 % вероятностью можно предполагать, что высотные профили массовой доли влаги за рассмотренные три года не

менялись. Вместе с тем они заметно отличаются на высотах от 0 до 2 км от профиля, построенного по эмпирической модели ГОСТ 26352-84, и, в целом, для этих высот видно превышение экспериментальных значений над модельными. Так, в январе, например, на высоте 1,5 км влажность больше модельной в 2 раза, а у земной поверхности в 2,5 раз.

Анализ модельных и экспериментальных данных для станции, близкой к  $50^\circ$  с. ш. и  $180^\circ$  з. д. — станция Shemya Earecksjn ( $52,71^\circ$  с. ш.  $174,10^\circ$  в. д.) показал, что за три года высотные профили массовой доли влаги практически не менялись (рис. 12). Однако в приземном слое в июле реальная влажность меньше модельной, а в январе наоборот. Выше модель неплохо согласуется с экспериментом.

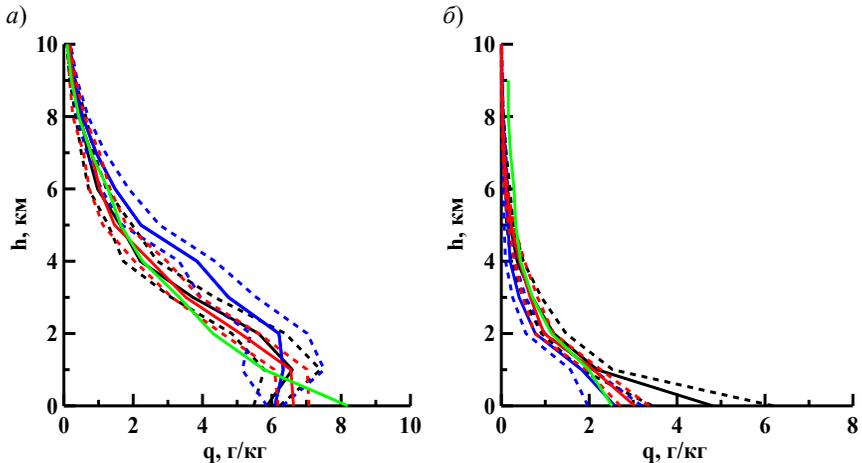


Рис. 12. Модельный профиль и экспериментальные осредненные за месяц высотные профили массовой доли влаги для 12 UTC на станции Shemya Earecksjn за июль (а) и январь (б) 2011, 2012, 2013 гг.

Черные линии – данные за 2011 г., синие линии – данные за 2012 г., красные линии – данные за 2013 г., зеленая линия – данные по модели ГОСТ 26352-84, штриховые линии - 95% доверительные интервалы средних величин высотных профилей массовой доли влаги.

На станции Nome Airport ( $64,50^\circ$  с. ш.,  $165,43^\circ$  з. д.), ближайшей к координатам  $70^\circ$  с. ш.,  $180^\circ$  з. д. для июля высотные профили массовой доли влаги за рассмотренные три года не менялись, а для января профили влажности существенно изменялись год от года. В июле в приземном слое реальная влажность оказалась выше модельной. В наименьшая влажность наблюдалась в 2012 г. и по значениям высотного профиля она близка к модельным значениям. В 2011 и 2013 гг. влажность в районе станции Nome Airport в январе превышала модельные значения. Возможно такое несоответствие модельных и экспериментальных данных связано с тем, что координаты расположения станции существенно отличаются от координат, для которых построены модельные профили.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный совместный анализ среднемесячных высотных профилей массовой доли влаги для долгот, близких к  $0^\circ$  в. д. (вдоль Гринвичского меридиана),  $80^\circ$  в. д. (пересекающий Евразию в её центральной части) и  $80^\circ$  з. д. (над Американским континентом),  $180^\circ$  з. д. (большой частью вдоль экватории Тихого океана) за июль и январь 2011—2013 гг. и профилей массовой доли влаги, построенными по эмпирической модели ГОСТ 26352-84, позволяют сделать следующие выводы:

- Для экваториальных широт экспериментальные значения высотных профилей влажности превышают модельные как в июле, так и в январе как для восточных, так и для западных долгот.
- В области низких широт для июля в районе  $0^\circ$  в. д. модель не достаточно адекватно отражает эксперимент, а в районе  $80^\circ$  в. д. достаточно хорошо, для западных долгот: в июле экспериментальные значения превышают модельные, а в январе отмечается хорошее совпадение эксперимента и модели для Американского континента по всей области высот, а для Тихоокеанского региона, начиная с 2 км. До высоты 2 км видно превышение экспериментальных значений над модельными.

- В области средних широт для июля как для восточных, так и для западных долгот наблюдается хорошее совпадение модельных и экспериментальных высотных профилей массовой доли влаги. Для января в районе  $0^\circ$  в. д. отмечается превышение экспериментальных значений над модельными по всему высотному профилю. При этом для  $80^\circ$  в. д., начиная с высоты 3 км, совпадение модели и эксперимента достаточно хорошее.

- В области высоких широт, как для восточных, так и для западных долгот для июля среднемесячные высотные профили массовой доли влаги за три года (с 2011 по 2013 гг.) практически не менялись. Для двух меридианов восточной долготы в июле модель адекватна эксперименту, начиная с высоты 4 км; для областей западных долгот: для станции Американского континента модель работает хорошо, начиная с 2 км, а для акватории Тихого океана экспериментальные значения массовой доли влаги превышают модельные на высотах от 0 до 1,5 км. В январе для восточных долгот выявлено превышение экспериментальных значений над модельными, а в районе  $80^\circ$  в. д. выявлена особенность: увеличение влажности от 0 до 1 км, хотя обычно она уменьшается с высотой. Возможно, это связано с инверсией температуры. Следует отметить, что модель отражает данную особенность. В январе для станции, расположенной на Американском континенте, в целом наблюдается хорошее совпадение модели и эксперимента. Для акватории Тихого океана можно сказать, что с 95 % вероятностью профили влажности существенно изменялись год от года. Наименьшая влажность наблюдалась в 2012 г. и по значениям высотного профиля она близка к модельным значениям. В 2011 и 2013 гг. влажность в районе станции Nome Airport в январе превышала модельные значения.

- Таким образом, для восточных долгот наиболее хорошее совпадение модельных и экспериментальных осредненных высотных профилей массовой доли влаги выявлено для низких и средних широт. Для экваториальных и высоких широт различия достаточно существенны. Для области западных долгот в целом модель хорошо отражает реальную ситуацию, начиная с высоты 2 км. Более или менее существенные различия отмечаются, как правило, в

пограничном слое атмосферы, который в решении многих задач играет определяющую роль. Результаты анализа показывают, что данная модель влажности воздуха в северном полушарии ГОСТ 26352-84 требует корректировки.

*Работа выполнена в соответствии с Проектом 2014-2016 гг. (НИР № 2573) "Совместное воздействие стратосферной циркуляции и теплового состояния океана на формирование длительных аномалий погоды и изменение климата и состава атмосферы" в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2014/166 № Гос. регистрации 01201458676 Коды темы по ГРНТИ: 37.21.31 37.21.15 37.21.37*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Модель влажности воздуха в Северном полушарии. ГОСТ 26352-84. (1984). — М.: Госстандарт СССР. [gostinform.ru/gosty/gost-26352-84.shtml](http://gostinform.ru/gosty/gost-26352-84.shtml)

Вентцель Е. С. (2010). Теория вероятностей: учебник / 11-е изд. — М.: КНОРУС. 664 с.

Данные по измерениям параметров атмосферы. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.weather.uwo.edu>

**ПРОФЕССОР К. С. ШИФРИН — ОСНОВОПОЛОЖНИК  
ПАССИВНОЙ СВЧ-МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ  
(РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИИ)**

*В. В. Мелентьев*

Государственный университет аэрокосмического приборостроения  
190000 Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67  
E-mail: vv.melentyev@mail.ru

Поступила в редакцию 18.09.2017

**Введение**

**К. С. Шифрин и его отношение к людям,  
к опыту предшествующих поколений,  
к юбилеям и мемуарной литературе**

Свои воспоминания о профессоре Шифрине я хочу начать с обсуждения именно этих вопросов. По опыту долгого и тесного общения с Кусизлем Соломоновичем — Ка-Эсом, как любовно называли его сотрудники, — знаю всю серьезность его отношения к мемуарному жанру. По опыту нашего знакомства я четко усвоил себе мнение К.С., что написание воспоминаний об ученых и творческих личностях, об их новаторстве и научных достижениях — дело не менее важное, чем публикация добротной научной статьи.

Безусловно, особое внимание следует уделять выдающимся и большим ученым, не забывая при этом и о научных достижениях предшествующих поколений. Следует также помнить и чтить окружение великих, чья деятельность, на первый взгляд, не столь значительна. Но это лишь на первый взгляд, ведь успешность теоретических расчетных построений, а тем более самолетных и

спутниковых экспериментов, складывается из соединенного труда множества людей. Успех общего научного предприятия зависит от добросовестности и ответственности всех и каждого, от личного их вклада. Таково было отношение К.С. к людям, и этой его установке мы постараемся следовать в наших записках.

Помню, как в бытность мою аспирантом Кузиэль Соломонович в деликатной своей манере посоветовал внимательно изучить сборник воспоминаний о Якове Ильиче Френкеле. Была там и прекрасная статья самого К.С. об этом выдающемся ученом, о временах собственной молодости Ка-Эса и о творческой атмосфере, царившей в Ленинградском физико-техническом институте в послевоенные годы.

Недавно в Интернете нашел эту книгу, заново перечитал заметки К.С. о его учителе. Отнюдь не устарела эта статья, и по-прежнему актуальным представляется тогдашнее его видение перспективных направлений оптических исследований. Посмотрите ее — многие идеи автора не реализованы по настоящее время.

По-видимому, тем же своеобразием отношения К.С. к опыту предшественников объясняется и его интерес к замечательной книге «Атомы у нас дома», которой в 1960-е годы зачитывались в СССР все интеллигентные люди, имевшие отношение к научному труду.

Вспоминаю 50-летний юбилей профессора Шифрина, который не просто отмечался, а праздновался в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО), где он трудился в те годы. Этот юбилей стал праздником не только для Кузиэля Соломоновича. Зал заседаний Ученого совета ГГО был полон. Народу — яблоку некуда упасть. Свои и приехавшие со всех концов Советского Союза люди стояли в проходах и между рядами кресел, сидели на полу. Даже в «предбаннике» теснились те, кому не удалось «вписаться» в пределы Малого зала, увешанного портретами «отцов основателей» российской гидрометеорологической науки — Купфера, Вильда, Рыкачева, Воейкова, Оболенского, Молчанова, Фридмана — научных предшественников высокочтимого юбиляра. Впрочем, и в самом зале в тот день собрался цвет тогдашней науки, многие видные и уважаемые «мэтры» почтили своим присутствием это торжество.

Без преувеличения могу сказать, что Обсерватория в те годы находилась на вершине своей научной активности всего советского периода. Возглавлял ее академик М. И. Будыко — выдающийся ученый-климатолог, первым указавший на возможность глобальных изменений климата за счет эффекта аэрозоля, CO<sub>2</sub> и ряда других парниковых газов.

Работали в ГГО в то время замечательные специалисты в области прогностической динамической метеорологии — профессора М. И. Юдин и Л. С. Гандин. В отделе радиационных исследований трудился академик К. Я. Кондратьев. Полярные исследования возглавлял проф. Н. П. Русин, отделом загрязнения руководил проф. М. Е. Берлянд. В отделе климатологии собрались не менее известные ученые — Е. С. Рубинштейн, О. А. Дроздов, Т. В. Покровская, В. М. Михель, Н. В. Кобышева, Е. Н. Романова, В. Н. Адаменко.

Разработкой актинометрических и озонметрических приборов, научно-методическим руководством метеорологической сетью, созданием методов и средств измерений прозрачности атмосферы, исследованиями физики пограничного слоя и электрических процессов в атмосфере занимались такие общепризнанные авторитеты, как И. М. Имянитов («Иду на грозу» Гранина — это о нем!), Ю. Д. Янишевский, Г. П. Гушин, М. С. Стернзат, И. Н. Нечаев, Д. Л. Лайхтман, А. С. Дубов, А. М. Броунштейн, Е. М. Сальман, Е. А. Полякова, Т. А. Огнева, В. А. Гаврилов, В. Б. Красильщиков, О. Д. Бартеньева, Е. П. Барашкова, Н. Е. Тер-Маркарянц и другие известные советские ученые и специалисты. О каждом из них и об их вкладе в отечественную науку можно сказать много добрых слов.

Чтобы довершить описание картины научного благополучия и высочайшего уровня тогдашних теоретических и экспериментальных исследований Обсерватории, упомяну, что и в библиотеке ГГО, насчитывающей более миллиона томов, трудились в те годы исключительно высококвалифицированные библиотекари. Заведовала библиотекой Елизавета Луарсабовна Андроникова, разносторонней культурой и образованностью не уступавшая своему брату — знаменитому писателю и тещу Ираклию Андроникову.

Расскажу такой случай. Во второй половине 1960-х годов мне пришлось заниматься «проблемой Аральского моря». И, конечно же, разбираясь с литературой и пытаясь найти наиболее значимые исследования этого уникального по своим гидрофизическим характеристикам водоема (одного из немногих в северном полушарии, где по неясным до конца причинам генеральное направление течений направлено «по часовой стрелке»), я «вышел» на Л. С. Берга и его классические исследования, по сути своей ниспровергшие общепризнанную в те годы теорию «прогрессивного усыхания Азии». Результаты работ будущего президента Географического общества потрясли меня, и захотелось написать беллетризованную биографию этого выдающегося ученого. Все было хорошо — и материала достаточно, и полевые записи и дневники Берга удалось разыскать. Но сам он «не давался» мне — «застегнутый на все пуговицы», закрытый человек. И тут пришло в голову обратиться к Елизавете Луарсабовне. Прежде всего она почти мгновенно разыскала в гигантском нашем книгохранилище толстенный том — оригинал прекрасно изданной и богато иллюстрированной монографии «Аральское море» 1901 года издания. А на все мои сетования сказала: «Я знала Берга, он и в самом деле не слишком раскрывался ученому сообществу. Но представьте себе молодого человека — горожанина, выпускника Московского университета конца XIX века, по своей воле отправившегося на край земли в только что присоединенный к России Туркестанский край. И там, среди пустынь и полудикого кочевого народа, умудрившегося не растеряться и по существу в одиночку провести столь грандиозные фундаментальные исследования».

Присутствовали на том юбилее Ка-Эса во множестве и мы — молодые сотрудники ГГО, выпускники Ленинградских гуманитарных и технических вузов «образца 1960-х годов». Тогда было принято приглашать «подрастающую поросль» отечественной гидрометеорологической науки на заседания Ученого совета. А уж пропустить мероприятие такого масштаба, как юбилей Ка-Эса, молодежь обсерватории, конечно, не могла.

Все собравшиеся тогда в Малом зале ГГО с нетерпением ждали и предвосхищали успех доклада профессора К. С. Шифрина, подводившего итоги своей деятельности на тот момент. И в самом деле, выступление получилось на славу! Чего стоило одно только его признание, что созданная им теория светорассеяния в мутных средах «произросла» из рассказа Антона Павловича Чехова «Черный монах»! Поистине игра ума разносторонне образованного высокоталантливого человека, когда новое научное знание возникает из размышлений о том, как герои этой замечательной чеховской новеллы, дабы уберечь фруктовые деревья от утренних заморозков, поджигают костры, покрывая свой сад дымовой завесой. Это наглядный пример функционирования творческой лаборатории большого ученого!

Были и другие научные выступления. Помню интересные доклады и сообщения физиков-оптиков, представлявших «дружественные» юбиляру московскую, белорусскую и эстонскую школы. Помню и большое число приветствий и поздравлений К.С. от иностранных ученых. А потом были стихи — «оптические и радиофизические поэтические приветствия и послания» — остроумные, теплые и глубоко прочувствованные.

Была и проза официальной части данного «мероприятия»: телеграммы, слова официальных обращений к юбиляру от различных организаций, принадлежащих самым разнообразным министерствам и ведомствам, с которыми Кусиэлю Соломоновичу довелось сотрудничать. Но и они, эти официальные оценки деятельности К.С., не выглядели натужными, неубедительными, наскоро придуманными. Воздав должное заслугам юбиляра, они украсили наш общий праздник.

При всем том хочу еще раз подчеркнуть серьезность отношения К.С. к своему юбилею и тому, что с ним было связано. Многие, как известно, и ученые, и неученые люди, стараются избегать подобных торжеств. Из скромности или деликатности боятся они цветов, долгих речей, а тем более всяческой «говорильни», изъявлений любви и преданности, расшаркиваний в свой адрес.

Кусиэль Соломонович другой — для него тот юбилей был своеобразным вариантом всесоюзного «оптико-актинометрического

съезда», лишним хорошим поводом для встреч с коллегами, плодотворных обсуждений и научных дискуссий.

Не помню, был ли банкет. Помню лишь, что всем было хорошо и весело от сознания причастности к жизни большого ученого, умного и одухотворенного человека. Все прошло достойно и, как говорится, «на высоте». А огромную кипу красиво разукрашенных толстенных папок и поздравительных адресов, содержавших множество хороших слов в адрес Ка-Эса, мы потом бережно собрали и на бело-синеголубеньком его «Москвиче»-стиляге, редко тогда у кого в Ленинграде имевшемся, благополучно доставили в квартиру семьи Шифриных на Старо-Невском проспекте.

### **Человек из «павильона Солнца», Или история моего знакомства с профессором К. С. Шифриным**

Профессор К. С. Шифрин, безусловно, относится к числу выдающихся ученых, созидателей новых направлений в науке, нового знания. Так что идея книги о Кузиэле Соломоновиче, посвящение ее 100-летию всемирно известного российского ученого физика-теоретика, представляется весьма своевременной и продуктивной.

Выход в свет этой книги важен не только для его многочисленных учеников и последователей. Кузиэль Соломонович — ученый «нобелевского» уровня, и его труды в области оптики атмосферы и океана признаны во всем мире. И потому публикация истории его жизни, сведений о его личности, особенностях характера, стиле работы, о его многогранных научных и творческих интересах, поисках, удачах и достижениях представляет интерес для широкой научной общественности. Издание, знакомящее с творческой лабораторией ученого такого «ранга», должно сослужить добрую службу студентам, аспирантам, молодым научным работникам и специалистам, в наше непростое время нацеленным на поиски своего места в жизни и науке.

Мне посчастливилось познакомиться с профессором К. С. Шифриным в мои совсем юные годы. Затем я стал его аспирантом, чем горжусь, и работал под его началом в Главной

геофизической обсерватории. Мы тесно контактировали и в те годы, когда он стал работать в Институте океанологии — вставал даже вопрос о моем переходе к нему в отдел оптики океана. Помню, как в связи с этим осенью 1974 года мы с Ка-Эсом ходили в один сверхзакрытый «почтовый ящик». И в тенистом садике, чтобы не подслушали нас случайно ни свои, ни чужие «плохие люди — агенты мирового империализма», договаривались с будущим академиком В. Г. Пошехоновым о совместной разработке для нужд АН СССР и Гидрометслужбы фазированной антенной решетки — новейшего слова тогдашней микроволновой СВЧ-радиометрии.

Здесь же в ЛО ИОАН свершился и чрезвычайно важный в моей научной карьере этап — первая предзащита докторской диссертации, ее одобрение при массе полезных и доброжелательных советов и пожеланий со стороны К.С. и его многоопытных сотрудников. А до того я все тянул, откладывал свой «выход» на защиту: отвлекали следовавшие одна за другой интересные работы, летные экспедиции, подспутниковые эксперименты, проводившиеся по моим программам на судах погоды от северных морей до тропиков и Антарктиды. Помню, как мудрый К.С. одергивал меня: «Володя, расставьте приоритеты!» Нынче я и сам частенько повторяю эту фразу студентам и молодым сотрудникам (конечно же, со ссылкой на первоисточник).

Позже, в 1980—1990-е годы, уже работая заведующим лабораторией дистанционных методов в Институте озероведения АН СССР, я не раз приходил в подвал на Таврическую, чтобы обсудить с Ка-Эсом проблемы оптических измерений и аэрокосмического мониторинга озер и водосборных территорий. Где только нам в те годы не приходилось работать: программа «Интеркосмос», крупные международные подспутниковые эксперименты на Ладоге, Онеге, Балхаше, на Рыбинском водохранилище, на многих других больших и малых разнотипных водоемах бывшего Советского Союза, а также в Польше и Болгарии. С деньгами, аппаратурой, судами, самолетами, вертолетами и прочей техникой проблем не было. Нужны были только свежие научные идеи — поистине это были «времена коммунизма» для советской науки.

Впервые же я встретился с Кузиэлем Соломоновичем в ранней своей молодости, где-то в конце 1950-х годов, не помню точно. Ту встречу на его даче в Воейково и тот первый мой визит «в случайные гости» к Ка-Эсу я хорошо запомнил. Заехали мы туда с моим дядей, Львом Александровичем Мелентьевым, и его женой — детской писательницей Екатериной Александровной Мелентьевой. Заехали после охоты для обсуждения вопросов, связанных с контролем «энергетической безопасности» тепловых станций, расположенных в черте Ленинграда.

Да-да, это не ошибка памяти — приехали мы к К.С. после охоты. В послевоенные времена, когда город не выходил за пределы Пороховых и Охты, в окрестностях Воейково можно было прекрасно поохотиться. Особенно хорошая охота начиналась сразу за окраинами деревни Янино, где справа от тогда еще бульжной дороги на Колтуши находились отличные дупелиные места. А слева от «шоссе» в полной боевой готовности в длинный ровный ряд угрожающе располагались зенитные пушки. Оставаясь здесь еще с войны, они и в то, относительно мирное, время были готовы защищать северные подступы к городу и аэропорту «Смольное» (ныне «Ржевка»).

Воейково, как мне объяснили, — бывшая финская деревня, получившая свое имя в 1949 году в связи со 100-летием Обсерватории, где находится загородная база ГГО. И там, в «павильоне Солнца», работает ученый, к которому мы направлялись.

Упоминание о человеке из «павильона Солнца» будоражило воображение. Однако поселок, в который мы въехали на дядюшкиной «Победе», не произвел особенного впечатления: непрезентабельного вида дома-бараки, приземистые избы. Воейково к тому же было изрыто окопами, опутано обрывками колючей проволоки. В годы блокады оно оставалось последним не захваченным фашистами возвышенным участком на правом берегу Невы, за который еще можно было «зацепиться» в случае прорыва немцев. Здесь же в войну находилась и воинская часть, обеспечивавшая метеосводками фронт и блокадный город.

Настроение мое, однако, стало улучшаться, когда мы увидели тот самый знаменитый «Круглый павильон» — оригинальной

конструкции золотисто-желтое здание с белыми полуколоннами, специально спроектированное так, чтобы не создавать фоновых засветок при измерениях потоков солнечной радиации. Увы, в актинометрическом павильоне человека, которого мы искали, не оказалось. «Он ждет вас у себя на даче!», — сказали нам.

Были тогда на даче и другие сотрудники. Но в памяти остался только он, как человек из «павильона Солнца», во всем своеобразии его внешности: копна золотисто-рыжих взъерошенных волос, голубые добрые глаза и вкрадчивый нетребовательный голос. Необычной была и его манера общаться с собеседником. Он не только внимательно слушал, но и слышал собеседника. А когда говорил он сам, то по остроте реакции оппонента убеждался в истинности своих суждений. Запомнилась его неспешность в разговоре и ожидание поддержки или несогласия с высказываемыми им мыслями. Эту своеобразную манеру общения я бы назвал «беседа-размышление».

Поразило в той загородной его даче и множество толстенных книг, помеченных какими-то особыми закладками. Они располагались и на старинном письменном столе, и на диване, и на подлокотниках кресел, и даже на полу. Однако весь этот беспорядок казался беспорядком лишь для новоприбывшего — сам хозяин дома во всем этом нагромождении книг, статей, журналов прекрасно ориентировался и буквально моментально находил в них все необходимые для продолжения беседы места и ссылки.

### **Мои молодые радиофизические и аэрокосмические увлечения и пристрастия, роль профессора К. С. Шифрина в их практической реализации**

Следующая столь важная и особо памятная для меня встреча с Кузиэлем Соломоновичем состоялась примерно через два десятка лет, и она определила мою дальнейшую судьбу. Случилось это в феврале 1966 года, буквально за день до окончания срока моей трехлетней обязательной послевузовской работы, когда я пытался найти для себя новую, не связанную лишь с инженерными расчетами, сферу деятельности.

Обучаясь на радиотехническом факультете института авиационного приборостроения, я прослушал пространные курсы лекций по теории поля, радиолокационным, радионавигационным и радиоизмерительным приборам. Читался нам и огромный двухгодичный курс по антенно-фидерным системам. Читался неинтересно, непонятно, невразумительно — сплошные аббревиатуры, сокращения, роторы дивергенции и дивергенции ротора, отталкивающий вид подстрочных индексов длиннющих формул, наспигованных буквально всеми имевшимися в греческом алфавите буквами. Всякие  $\tau$ ,  $\lambda$ ,  $\omega$ ,  $\sigma$  и  $\theta$  — еще куда ни шло, освоили. А вот разбираться со всевозможными  $\zeta$ ,  $\xi$ ,  $\chi$ ,  $\varsigma$  или  $\psi$  было уже выше всяческих сил. Чтобы не провалиться на экзамене и получить вождеденную стипендию, мы тупо заучивали все эти кошмарные «буквословосочетания». До сих пор я, как в кошмарном сне, порою вспоминаю зазубренную нами словесную тарабарщину: эта-тот ми-фа в э-фи ме-тит!

Однако именно там, в ЛИАПе, в принципе, я и определился с планами на будущую жизнь. Меня увлекла теория распространения радиоволн — наука, которая пересекается со столь нелюбимыми «антеннами». Читался этот курс нам всего один семестр. Но лектор — молоденькая доцент Говоруха — читала его внятно, убедительно, доходчиво. «Физично», как я теперь определяю ту ее манеру, которую впоследствии я с радостью нашел у Шифрина.

Мы буквально заслушивались ее лекциями, потрясенные видом зависимостей поглощения и рассеяния радиоволн при их прохождении земной атмосферы. Из контрастов излучения облачности и осадков стала ясной и возможность решения обратной задачи — восстановления по радиосигналу характеристик состояния атмосферы. Нам этого, конечно же, не объясняли — в ЛИАПе нас учили разработке высокоточных головок наведения ракет.

Но как практически осуществить мои научные амбиции? К концу февраля 1966 года меня согласны были взять на работу кафедра радиолокации ЛИТМО, Пулковская обсерватория и Институт земного магнетизма и распространения радиоволн Сибирского отделения АН СССР. Один научный центр другого краше! И самым

привлекательным казался мне, конечно же, находящийся в Иркутске СИБИЗМИР. Там начинались работы по созданию крестообразного радиотелескопа — одного из крупнейших в мире!

Помню, как я штудировал книгу Ж. Леку «Радиоастрономия», как исподволь готовился к отъезду в дальние края, как потихоньку собирал нехитрые свои пожитки. Проблема состояла в том, как сообщить родителям о своем окончательном и бесповоротном решении!

И вдруг звонок! Как сейчас я это помню и слышу мягкий интеллигентный голос: «Здравствуйте! С Вами говорит профессор Шифрин из Главной геофизической обсерватории. Знаю, что Вы инженер, но интересуетесь проблемами радиоизмерений в свободной атмосфере. Мы же, как раз сейчас, проводим соответствующие теоретические расчеты. А на борту нашего самолета-лаборатории Ил-18 разворачиваем программу комплексных экспериментов, в том числе с использованием радиодиапазона. Полеты проводятся в Арктике и на Дальнем Востоке, но основным полигоном является Каспийское море, поскольку схема «самолет — море» служит моделью планируемых экспериментов «ИСЗ — океан». И если это покажется Вам интересным, приходите к нам завтра в Обсерваторию. Познакомимся поближе, побеседуем с начальником отдела. Может быть, наши интересы и совпадут!»

«Самолет-лаборатория! Полеты в Арктику!» — да это же предел мечтаний моего поколения, воспитанного на описаниях полярных странствий Седова, Нансена и на множестве других подобных книг, издававшихся тогда в Географгизе.

Не спрашивая, откуда и как узнал профессор о тайных моих помыслах, я буквально «обалдел» от счастья. Подыскать иное слово для описания моего состояния навряд ли возможно!

И, конечно же, в строго назначенный час я не прибыл, а прилетел на крыльях в указанное место. К.С. неспешно рассказал мне об истории возникновения ГГО, о великом ученом-климатологе А. И. Воейкове, о собственных своих идеях в области климатологии и радиометеорологии, о спутниковой океанографии, о проблемах дистанционной диагностики Земли из космоса, о начинавшихся тогда

в отделе радиационных исследований работах в области пассивной радиометрии.

Это был «высший пилотаж» — на всем моем долгом жизненном пути, пожалуй, только Кусиэль Соломонович умел так доступно (и так именно «физично»!) объяснять сложнейшие природные процессы и явления. Так что и мне, юнцу-неофиту, приоткрылась тогда суть глобальных исследований, проводившихся в Обсерватории под руководством профессора Шифрина.

Короче, как говорят теперь нынешние мои студенты — «я погиб»! Все предшествующие мои планы рухнули, улетели в небытие!

Так по «призыву» профессора Кусиэля Соломоновича Шифрина день в день после окончания работы в «почтовом ящике» я пришел в ГГО. Пришел, чтобы остаться здесь на многие и, по твердому моему убеждению, лучшие мои годы. Готов поручиться не только за себя, но и за всех нас, тогдашних — бывших сотрудников Ка-Эса, что все, что связано с ГГО, стало нам родным и близким. А само это здание ГГО, казалось бы скромное двухэтажное, представляется высоким и величественным храмом науки, исполненным в строгих классических архитектурных пропорциях!

Несколько слов об отделе радиационных исследований (ОРИ), куда я был принят, и который возглавлялся тогда В. Л. Гаевским. Препровождая меня в кабинет к Василию Леонидовичу, К.С. шепнул мне: «Только не пугайтесь строгого вида нашего начальника!»

Василий Леонидович Гаевский был выдающимся организатором науки, человеком высочайшей порядочности и честности. В блокадном Ленинграде он исполнял обязанности директора ГГО, а после окончания войны, когда так называемый «суд чести» добивался изгнания академика Е. К. Федорова из Гидрометслужбы за «преклонение перед западной наукой», он оказался единственным, у кого хватило мужества не подчиниться приказу всемогущего тогдашнего коммунистического идеолога Льва Мехлиса и встать на защиту ученого-«папанинца». При голосовании по «делу Федорова» он воздержался! Лишь те, кто жил в те времена, в состоянии понять и оценить весь героизм этого поступка Василия Леонидовича.

Именно В. Л. Гаевский стал инициатором первых в нашей стране авиационных мультиспектральных исследований природных объектов и сред. Начинались эти работы на крохотном ленд-лизском американском Боинге, умудрявшемся совершать посадку на футбольное поле поселка Воейково. Стараниями Василия Леонидовича и поддержкой Е. К. Федорова (когда бываю в Москве на Новодевичьем кладбище, всегда подхожу к его могиле) ОРИ, помимо самолетов Ли-2 и Ил-14, в начале 1960-х годов получил и уникальную летающую лабораторию Ил-18. На борту этого самолета осуществлялись крупные междисциплинарные исследования, проводившиеся по схеме «самолет-лаборатория — ИСЗ — научно-исследовательское судно». На нем перед установкой на ИСЗ испытывались и спутниковые приборы.

Еще один характерный пример доброго отношения К.С. к людям. При всех своих высоких человеческих качествах В. Л. Гаевский как ученый не занимал каких-то особых ведущих позиций в науке. Человек, безусловно, талантливый, он не смог получить достаточного образования. Уроженец города Ряжска Рязанской губернии, выходец из простой крестьянской семьи, он окончил так называемый фабзавуч — курс ускоренного обучения для студентов с приемлемым по советским меркам «красно-пролетарским» происхождением. Человек скромный, не слишком амбициозный, критичный к себе и своим возможностям, Василий Леонидович и сам прекрасно понимал недостаточность своего образования. По рассказам старейших сотрудников ОРИ, он мог прийти к К.С. и примерно в таких словах высказать просьбу: «Я тут вот написал статью, посмотри внимательно. Не допустил ли я в ней каких-либо особых ляпов». По партийной своей закваске Гаевский привычно обращался с подчиненными на «ты».

Он был, как теперь бы его назвали, прекрасным менеджером, образцовым организатором научного процесса. Прекрасно разбирался в людях, ценил и уважал того же Шифрина, продвигал в науку молодежь. Вдвоем они составляли отличную «связку», и отдел работал на славу. Увы, Василий Леонидович рано ушел из жизни. Помню, как в связи с этим К.С. много и долго хлопотал,

подготавливая некролог о Гаевском. Почему-то и в этом, казалось бы, очевидном случае существовали какие-то непонятные коммунистические запреты. Отдавая дань памяти коллеге, К.С. многократно исправлял и переписывал в некрологе каждую фразу — сборник «Трудов ГГО» посвящался памяти В. Л. Гаевского.

Упомянув о странностях минувшего советского времени, не могу не вспомнить и о борьбе Кусиэля Соломоновича с издателями его монографии «Оптика океана», которую он хотел посвятить памяти отца. При всей своей мягкости и интеллигентности он мог добиваться своего, если дело его, как говорится, было правое. Борьба за посвящение отцу была долгой и упорной, и, если я правильно помню, К.С. все-таки своего добился.

То советское время было в чем-то великим, а в чем-то смешным и нелепым. Приведенный выше случай — не исключение. Приведу еще один известный мне пример высокого уважения К.С. к труду своих предшественников и коллег. После смерти проф. Б. Л. Айзенберга — крупного ученого, специалиста в области электроэнергетического проектирования и строительства кабельных сетей — по каким-то советским законоположениям никак не удавалось опубликовать памятную статью (очерк жизни Бориса Львовича) в московском журнале «Электричество», многолетним автором которого он являлся. Лишь вмешательство члена Президиума АН СССР академика Л. А. Мелентьева позволило «разрулить» ситуацию. В итоге статья-некролог о Борисе Львовиче Айзенберге за подписями многих ведущих специалистов и экспертов все-таки появилась в этом солидном электроэнергетическом журнале, редакция которого действовала отнюдь не по злобе, а была вынуждена руководствоваться предписываемыми сверху законоположениями и правилами.

### **К.С. и наши семинары**

Мне пришлось много поехать по миру, побывать во многих исследовательских и учебных центрах западной и восточной Европы. Слушал я и тамошние защиты диссертаций, читал лекции студентам,

присутствовал на множестве международных научных конференций и семинаров. Но что поражало, не повсеместно, конечно же, — это формализм научных обсуждений, диктатура председательствующего, почти полное отсутствие дискуссий. Задать разрешается не более двух-трех вопросов! А если у вас возникают какие-либо возражения докладчику — пожалуйста, но это в рабочем порядке за пределами аудитории, во время так называемого «кофе-брейка»!

Я уже писал о творческой активности молодежи ГГО того времени, но семинары, которые устраивались Ка-Эсом, — это забываемо. Надо было там «самолично» присутствовать и воочию наблюдать все происходившее.

Расскажу о прохождении самих семинаров, которые, естественно, посвящались различным аспектам многоспектрального зондирования, разработке методов и аппаратуры для многоцелевой дистанционной диагностики различных типов подстилающей поверхности и земной атмосферы.

Тема основного доклада, посвященная решению той или иной конкретной задачи, объявлялась заранее и со значительной заблаговременностью. Заранее выбирался и основной докладчик. Обычно это был сотрудник, который занимался теоретическим обоснованием данного направления. И всегда во всех обсуждениях во множестве должны были быть представлены экспедиционные материалы — самолетные, вертолетные, наземные и судовые данные, материалы аэростатного аэрологического зондирования.

Приглашения на семинар рассылались по всему Советскому Союзу, как в организации Госкомгидромета, так и в «сторонние» институты, расположенные и в Ленинграде, и далеко за его пределами. Побывать на семинаре у Ка-Эса почиталось за честь, а билеты из Тбилиси, Минска или даже из Владивостока при цене бензина 5 и 6 десятых копейки за литр в те годы практически ничего не стоили.

В итоге на заседания собирались и сотрудники ОРИ, и коллеги из других отделов ГГО, и представители многих «дружественных» организаций, заинтересованных в успехе и в конечном продукте

данного направления исследований — метеорологи, климатологи, физики, оптики, «радиационщики», прибористы.

На семинаре все чувствовали себя абсолютно свободными. Полная демократия — любой младший техник, инженер, аспирант, не говоря уже о многоопытных специалистах, могли участвовать в дискуссиях, задавать любые, даже самые неожиданные и каверзные, вопросы.

Приведу один запомнившийся пример. Наш лаборант Алик Мокрицкий, студент-заочник Лесотехнической академии, ответственный за калибровку аппаратуры на Ил-18, явившийся на семинар, так скажем, по зову собственного сердца, задает Ка-Эсу вопрос, суть которого связана с калибровкой СВЧ-аппаратуры по жидкому азоту. «Согласованная нагрузка погружается в азот. Азот кипит, расплескивается. Разброс точек на графике при этом велик настолько, что не понятно, какой брать отсчет для привязки измерений».

Первая реакция К.С. — недоумение. Вопрос чисто технический — к нему, казалось, и не имеет отношения. Да и по теории всё, вроде бы, предельно ясно. Калибровка жесткая, уровень азота строго фиксирован. Как может что-либо подобное сказываться на измерениях?

Короткая пауза. Взор Ка-Эса устремляется поверх наших голов куда-то далеко за пределы аудитории. А затем, наклоня голову чуть влево, он начинает размышлять прилюдно вслух. Неспешные фразы — одна, другая. Из памяти извлекаются похожие сюжеты, анализируются аналоги. Но вот «в дело» вступают руки. Как сейчас вижу перед собой эту сцену и эти руки, которые помогают всем нам, замороженно следящим за ходом его размышлений, и реально видеть, как решается важнейшая проблема, и как бы наглядно «лицезреть» выстраиваемое им здание нового научного знания. И, наконец, заключение профессора: «Да, Вы правы. Такое возможно. А выходить из положения нужно так-то и так-то». И ни тени превосходства или иронии. Разговор на равных.

Запомнился мне тот случай, наверное, и потому, что предложения Ка-Эса оказались полезными для моей работы. Незадолго до этого семинара я показывал ему данные лабораторных измерений

коэффициентов излучения различных типов подстилающей поверхности. И он заметил: «Все хорошо. Но нельзя ли уменьшить разброс точек на кривой?» Помню и ответную мою реакцию. Как это уменьшить — о чем он говорит, меряем и меряем, так вот все и получается. А вот молодой сотрудник поднял проблему, задал вопрос для всех нас важный — ведь аппаратура и в самолете, и в лаборатории практически одна и та же!

А профанаций в аэрокосмической науке Ка-Эс не мог терпеть! Вспоминается: Москва, зал Ученого совета Института физики атмосферы АН СССР, солидный семинар, ведет его академик А. М. Обухов. Присутствуют видные ученые, почетные гости, важные московские персоны.

В заключение еще одно выступление: «Визуальные наблюдения с космических кораблей «Салют» и «Союз». Сообщение делает герой-космонавт Севастьянов. Многих я повидал космонавтов, разные они, и в большинстве своем добросовестные и вдумчивые исследователи. Но этот держится высокомерно, с высокой, и в самом деле высоко над всеми нами расположенной, трибуны не говорит — вещает. Рассказывая о наблюдениях за прозрачностью и цветностью океана, с апломбом заявляет, что ему удавалось следить из космоса за состоянием морского дна на глубинах более ста метров!

Но зал, похоже, ничего особенного в этом не замечает, продолжает и далее внимать оратору. Но вдруг рука. Негромкий голос: «Простите, но по теории не получается».

Это Ка-Эс! Он верен себе, халтуры и приблизительности он не выносит. И потому вступает за дело, за свою науку, пытаясь объяснить «дважды герою» причины, почему не удастся столь глубоко «заглядывать» под воду.

Быть может, я и забыл бы этот случай. Каждый может ошибаться. А если поправляют — запомни, не упорствуй в заблуждениях. Но не таков был этот космонавт. Все так же свысока, в сознании собственного величия, перебивает Ка-Эса. Зал притих. Всем захотелось под землю или под воду провалиться! Ведь все прекрасно понимали, с какой рекламной целью он был вовлечен в науку и увенчан почетными регалиями!

«Феноменологичность» подхода, исследование всей совокупности параметров природного процесса в целом — вот что являлось сильной стороной работ и самого Ка-Эса, и его учеников. Помню доклад на семинаре в ГГО Миши Черняка. Приехал он из Кабардино-Балкарии, тогда мирной, вполне благополучной северокавказской республики. Там в Нальчике находится Высокогорный геофизический институт, основанный в послевоенные годы академиком Е. К. Федоровым.

Темой диссертационной работы М. М. Черняка стало использование средств мультиспектральной СВЧ-радиометрии для контроля процессов градообразования в конвективных кучевых облаках. И я помню, как торжественно, с каким удовольствием, предваряя доклад своего аспиранта, К.С. попросил всех нас, собравшихся на семинар, обратить особое внимание на сделанное ими на основании теоретических расчетов открытие неизвестного ранее феномена. Оказывается, что при некоторых состояниях облака его излучение в радиодиапазоне при нагревании начинает падать!

И этот эффект они собираются использовать для обнаружения в грозовых облаках градоопасных участков, которые, как они считают, должны оказываться наиболее уязвимыми для противоголовоых зенитных орудий, успешно применявшихся Гидрометслужбой СССР для активных воздействий на конвективную облачность и предотвращения уничтожения сельскохозяйственных угодий и виноградников градом в южных районах нашей страны. Увы, блеск этого научного открытия оказался понятен лишь немногим посвященным!

Правда, потом и нам удалось показать, что подобный эффект от «похолодания» контрастов в радиодиапазоне возможен также и при зондировании из космоса сплошных сред. Как показали наши расчеты, при этом оптимальными для картирования морских и пресноводных акваторий оказываются, соответственно, сантиметровый и дециметровый диапазоны в комбинации с термосъемкой на длине волны 0,8 см. Двухканальный знако-контрастный метод (ДЗКМ) термики разнотипных водоемов первоначально был реализован на борту советской космической станции «Алмаз». А впоследствии аппаратура ДЗКМ использовалась

при производстве первой в мире микроволновой съемки планеты Венера, осуществлявшейся аппаратами «Венера-15» и «Венера-16».

### **К. С. Шифрин — «отец» российской и мировой радиотеплолокации**

В настоящее время микроволновые радиометры являются одним из главных инструментов проведения глобальных геофизических и климатических исследований. На самолетах-лабораториях и большинстве из ныне действующих ИСЗ размещается одновременно до полутора десятков спектрально-поляризационных СВЧ-микроволновых комплексов. Но, к сожалению, вся эта аппаратура и все эти спутники иностранные!

И все же каждый день разбросанные по всему Земному шару сотни тысяч реальных пользователей — метеорологов, океанологов, экологов, геофизиков, гидробиологов, разведчиков недр, военных экспертов и добытчиков природных ископаемых, а в последние годы, с нашей легкой руки, и маммалиологов-териологов (специалистов в области изучения миграций морских животных) — заходят в Интернет и привычным движением компьютерной мыши находят там постоянно обновляемые СВЧ-карты состояния и сплоченности морского и пресноводного льда, данные о волнении на море, о распределении облачности и осадков.

Жизнь, увы, — ускользающая реальность, и сейчас мало кто помнит о пионерских работах профессора Кузиэля Соломоновича Шифрина в области создания методологии пассивной микроволновой радиометрии. Не знают по разным причинам. В том числе и потому, что было ошибкой изъятие имевшегося в наше время обязательного предписания ВАК, чтобы содержанием первой главы диссертации непременно был обзор предшествующих работ по данной теме.

Но факт остается фактом — это было «сделано в СССР», и первым в мире микроволновым спутником был «Космос-243»! Теоретическое же обоснование возможности аэрокосмической и наземной микроволновой дистанционной диагностики параметров состояния

Земли и ее атмосферы впервые в мире было выполнено профессором К. С. Шифриным.

Сейчас, в 2017-м году, когда пишутся эти воспоминания, нам в России не до науки. Но вдруг... когда-нибудь, хотя бы у историков, возникнет желание разобраться с «микроволновым вопросом», и справедливость восторжествует!

Идея использования собственного теплового радиоизлучения Земли для картирования состояния водной поверхности (температура, соленость, характеристики волнения, приводный ветер, ледяной покров) и поверхности суши (влажность почвы, растительность, снежный покров, многолетнемерзлые грунты), для восстановления параметров состояния атмосферы (влаго- и водосодержание, осадки) впервые была сформулирована именно профессором Кусизлем Соломоновичем Шифриным, ставшим, таким образом, «отцом» советской и мировой радиотеплолокации.

По моему твердому убеждению, фундаментальные исследования профессора К. С. Шифрина достойны нобелевской премии.

В 2000-е годы мне довелось работать в Швеции и там, на месте, узнать от членов шведской Академии о «кухне» нобелевского процесса. Так вот, не внутренние наши конкурентные распри, а закрытость тогдашней советской науки, отсутствие хороших и удобных западных (лучше всего американских) партнеров оставили нашу страну без еще одного, вполне заслуженного «Нобеля».

Первые микроволновые исследования начались в Советском Союзе в первой половине 1960-х годов. Проводились они в рамках Плана НИР и ОКР Госкомгидромета СССР. Однако по причине секретности разработок и возможного их использования в военных целях работы эти были закрыты для широкой научной общественности (тема имела специальный шифр «Гроза»).

Сборник «Трудов ГГО» (вып. 222 за 1968 г.), содержащий результаты теоретических расчетов, а также данные натурных многоцелевых самолетных и наземных микроволновых измерений, стал первым в мире коллективным научным изданием, подытоживающим результаты теоретических и экспериментальных исследований в области радиотеплолокации, выполнявшихся по

согласованной программе в разных научных учреждениях Советского Союза. Вводная основополагающая статья в этом выпуске «Трудов ГГО» была написана научным руководителем работ профессором К. С. Шифриным в соавторстве с кандидатами физ.-мат. наук Ю. И. Рабиновичем и Г. Г. Шукиным.

Справедливости ради отметим, что первая открытая публикация по микроволновой проблематике была сделана академиком К. Я. Кондратьевым, напечатавшим результаты работ этого направления, проводившихся на кафедре физики атмосферы Ленинградского университета, в журнале «Метеорология и гидрология» № 2 за тот же год.

Заслуга дальнейшей творческой разработки этой идеи в СССР и доведение ее до многоцелевого практического использования на борту самолета и спутника принадлежит школе профессора М. Е. Башаринова, профессору Л. Т. Тучкову, академику К. Я. Кондратьеву, чл.-корр. АН СССР В. В. Богородскому, доктору физ.-мат. наук Г. А. Лебедеву и возглавлявшимся ими коллективам.

Отметим и существенный вклад в успех микроволнового зондирования Земли с различных типов аэрокосмических носителей старшего научного сотрудника ГГО Ю. И. Рабиновича, профессора Г. Г. Шукина, а также профессора Д. В. Шанникова, В. А. Назаркина, профессора, доктора физ.-мат. наук А. И. Шутко, Б. Г. Кутузы, Д. Т. Матвеева, Л. М. Марцинкевич, В. Г. Волкова, В. А. Андрианова и многих других советских исследователей.

Американцы позже нас оценили преимущества данного вида зондирования. По откровенному признанию известного эксперта в области дистанционной диагностики многослойных сред доктора J. Zwally, в те далекие 1960-е годы «в области микроволновых технологий и лидарного зондирования NASA приходилось учиться на статьях советских исследователей» (частное сообщение, IGARSS, июнь 2006 г.).

Приведем и еще один также малоизвестный факт, что переводы на английский язык «Трудов ГГО» и других советских научных изданий по СВЧ-проблематике были тогда поставлены, что называется, «на поток». И не только в США, но и в Израиле, и даже в Индии. Так

сборник «Трудов ГГО», вып. 222, сразу же после выхода в СССР был издан в Израиле, труды экспедиции «Беринг» — в Индии. По информации наших коллег, побывавших в Эймсовском центре NASA в Мериленде, в библиотеке этого центра имелись все выпуски «Трудов ГГО» по СВЧ-микроволновой радиометрии.

О советских истоках микроволновой радиометрии, увы, сейчас мало кто вспоминает. Даже мы, последние свидетели тех работ, начинаем порой сомневаться, а было ли это всё на самом деле.

Да! Было! И обосновать профессору К. С. Шифрину реальную возможность микроволновой дистанционной диагностики многочисленных параметров состояния Земли и ее атмосферы было непросто. Была дискуссия, были и самые активные возражения. По свидетельству Ка-Эса, в Москве, в Госкомгидромете СССР, его когда-то ознакомили с письмом проф. А. Г. Горелика из Центральной аэрологической обсерватории (его отец был выдающимся экспертом в области теории распространения радиоволн), в котором доказывалась бесперспективность данного направления для гидрометеорологии.

Проблема, которую, по мнению оппонентов К.С., невозможно было решить — малая величина самих тепловых шумов в микроволновом диапазоне. Однако главным препятствием на пути внедрения микроволновых технологий в реальную практику, по их мнению, является большая, чем в ИК-диапазоне, изменчивость излучательных свойств различных подстилающих поверхностей, влияние на их излучение множества разнонаправленно действующих природных процессов и факторов.

Увы, пропагандировать и внедрять свои идеи К.С. не умел. Жизнь его — образец не запятнанного материальными интересами «донкихотского» служения отечественной науке. Трудился не службы и карьеры ради. Главным для него было обретение истины, желание разобраться в тонкостях и хитросплетениях физики исследуемого природного процесса. И чем сложнее, чем многофакторнее он оказывался, тем интереснее и увлекательнее было ломать голову над его объяснением и математическим описанием.

Кусиэля Соломоновича отличала внутренняя свобода и независимость, пренебрежение к быту, к условностям, к одежде, к

еде. Он никогда не был ученым-сухарем, затворником науки. Мы знаем иных ученых, не ведающих ни о чем дальше собственного письменного стола. Нет, с Ка-Эсом можно было запросто поговорить о последнем потрясшем советскую интеллигенцию психологическом романе, посопереживать героям какого-либо захватывающего кинофильма, послушать его чтение стихов. В научном мышлении всегда присутствует элемент поэзии, так что, наверное, и поэтому он знал их на память великое множество. В том числе, вдохновенно читал и неожиданно прекрасную, не известную молодым «снобам» любовную лирику таких комсомольских поэтов, как Александр Жаров, Иосиф Уткин, Степан Щипачев. С ним вместе можно было от души попеть на наших застольях запрещенные тогда песни Галича, посмеяться над шутками из ГГОВского капустника. Славное было время! До сих пор убеленный сединами «ученый люд» вспоминает те веселые вечера и скромные застолья.

Обо всех общественно-политических событиях в стране и в мире К.С. знал, со всеми литературными новинками, с художественными выставками и авангардными эстетическими изысками был знаком. Доброй феей и советчицей по этим «ненаучным сторонам» тогдашней нашей жизни была для Ка-Эса Елизавета Марковна Шифрина, веселая, всегда улыбчивая, высокообразованная женщина, его верная и надежная спутница.

Помню наши беседы на кухне на Старо-Невском, чай с лимоном, характерную позу Елизаветы Марковны, непрременную папиросу в зубах. Я человек книжный и потому «доставал» ей книги (был в те годы такой общепонятный термин). Привозил их из экспедиций, дарил или давал почитать. Особенно любила она книги о животных.

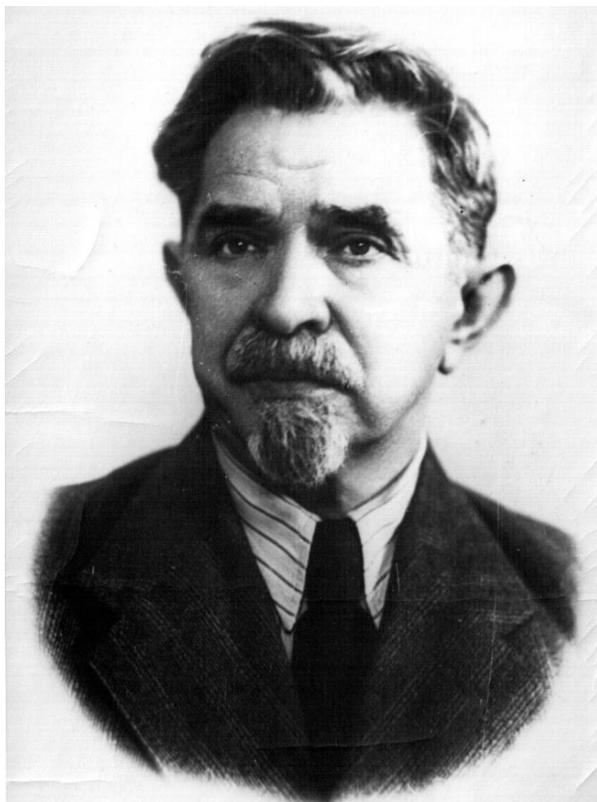
Помню и наши поездки с Е. М. Шифриной и Е. А. Мелентьевой на заседания секции «научной фантастики и детской литературы», проходившие в еще не сгоревшем тогда Доме писателей на набережной Кутузова. Ка-Эса не брали — все главные события дня ему пересказывались.

И как все это тоже было интересно! Секцией руководил младший из братьев Стругацких, а писатели, там собиравшиеся, были один ярче и амбициознее другого. Вечер кончался, а прощаться не хотелось!

Недавно в биографии Эйнштейна я прочитал: «Велик не тот, кто много знает, а тот, кто много прибавляет к тому, что знали до него». Профессор Кусиэль Соломонович Шифрин — как раз из тех, из немногих. Он много знал и многое добавил в науку! Но при всей уникальности и мощи его интеллекта он видится мне похожим на своих сверстников — великих ученых физиков-теоретиков его поколения. Он действительно ученый, много и вдохновенно работавший во славу мировой науки. И к нему легко и свободно прикладывается это, столь ко многому обязывающее высокое звание — Ученый, которое даже великий и ироничный Ландау опасался прикладывать к себе.

Санкт-Петербург  
10 октября 2017 г.

**Павел Николаевич Тверской**  
**(1892 — 1962)**  
*К 125-летию со дня рождения*



*Тверской Павел Николаевич — доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки СССР.*

*Специалист по геофизике и атмосферному электричеству, автор фундаментального "Курса метеорологии" (1951, 1962), основоположник эманационного метода разведок полезных ископаемых.*

Павел Николаевич Тверской родился 10 ноября 1892 года в Мышкине Ярославской губернии в семье почтальона телеграфной конторы. После окончания в 1911 г. гимназии в Севастополе он поступил в Санкт-Петербургский университет на физико-математический факультет. В 1915 г. после окончания университета он был принят на работу в Главную физическую (ныне геофизическую) обсерваторию (ГФО).

П. Н. Тверской начал работу в качестве адъюнкта Павловской магнитно-метеорологической обсерватории. В этом подразделении ГФО, где определились его научные интересы, выявились его творческие и организаторские способности, он успешно проработал более 15 лет.

Первый год молодой сотрудник занимался аэрологией и выполнил обобщение результатов аэрологических наблюдений, выполненных в Павловске. В результате этой работы в 1918 г. в Метеорологическом вестнике появилась первая публикация П. Н. Тверского.

В 1916 г. П. Н. Тверской начал заниматься исследованиями по атмосферному электричеству. Инициатором и руководителем этих новых тогда работ был профессор В. Н. Оболенский. С уходом В. Н. Оболенского из Павловской обсерватории (1918 г.) работы по атмосферному электричеству были поручены П. Н. Тверскому, и дальнейшее развитие этой области геофизики — заслуга Павла Николаевича. В 1925 году было создано специальное отделение атмосферного электричества, которое многие годы возглавлял П. Н. Тверской, при этом он руководил организацией исследований по атмосферному электричеству во всей стране.

В дальнейшем отделение атмосферного электричества расширилось до самостоятельного отдела. Небольшой павильон на территории Магнитно-метеорологической обсерватории, в котором начинались работы, уже не мог обеспечить постановку всех видов наблюдений в этой области, и в начале 1930-годов отдел расположился в отдельном здании. В отделе работали ученики Павла Николаевича: Б. Ф. Архангельский, Р. А. Аллик, Н. Н. Герасимова, Н. И. Леушин, Е. С. Меркулова, Б. Ф. Лоч и др. Одному из них — Н. И. Леушину — Павел Николаевич в 1932 г. передал заведование

отделом (в связи со своим назначением на должность заместителя директора ГГО по научной работе).



Здание отдела атмосферного электричества Павловской магнитно-метеорологической обсерватории.

В этот период программа работ по атмосферному электричеству была уже весьма обширной. Отдел участвовал в крупных международных исследовательских проектах. Так, в период Второго Международного полярного года были организованы измерения электрических параметров атмосферы в Арктике.

П. Н. Тверской был членом советского полярного комитета и участвовал в разработке программ по изучению атмосферы в Арктике.

Большая работа проводилась по подготовке научного оборудования для стратостатов «СССР-1» и «Осавиахим-1», подъем которых состоялся в 1933 и 1934 гг.

В апреле 1934 г. Академия наук СССР провела Всероссийскую конференцию по изучению стратосферы. П. Н. Тверской был членом оргкомитета конференции и руководил одной из ее секций. Позднее

он был включен в состав постоянного стратосферного комитета, председателем которого был академик С. И. Вавилов.

С середины двадцатых годов П. Н. Тверской изучал влияние электрического состояния ионосферы и других геофизических факторов на распространения радиоволн. В 1927 г. под руководством П. Н. Тверского были организованы первые систематические наблюдения за атмосфериками и распространением радиоволн, а несколько позже (в 1933 г. совместно с профессором М. А. Бонч-Бруевичем) начаты работы по изучению ионосферы — исследования слоя Хэвисайда.

П. Н. Тверской изучал радиоактивность осадков, свободные заряды в атмосфере и вертикальный ток проводимости. Анализ выхода радиоактивной эманации из почвы, выполненный в 1923—1926 гг., лег в основу радиометрического метода разведочной геофизики. Он совместно с А. Г. Граммаковым дал физическое обоснование эманационного метода геофизической разведки. П. Н. Тверской участвовал также в обосновании и развитии гамма-метода.

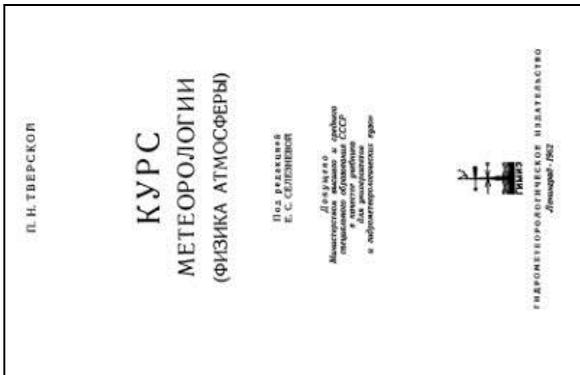
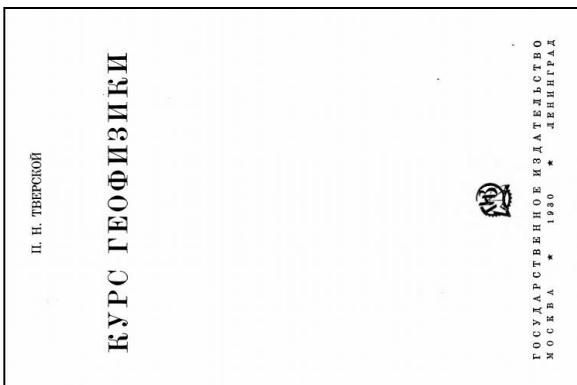
В период с 1933 по 1938 гг. П. Н. Тверской совмещал разностороннюю научную деятельность с большой административной работой заместителя директора ГГО. Он был назначен на эту должность по рекомендации Ученого совета ГГО как геофизик широкого профиля.

В 1938 г. с переходом Павла Николаевича в ЛГУ завершился определенный этап его научной деятельности. За годы работы в ГФО-ГГО (1915—1938) им было опубликовано более 40 статей, в которых отразились основные направления в развитии исследований в области атмосферного электричества тех лет. В статьях приводились результаты наблюдений за параметрами атмосферного электричества, за интенсивностью ионообразования, проникающей радиацией, обсуждались важнейшие вопросы научного и прикладного значения.

Так, в Трудах 1-го Геофизического съезда (1925 г.) опубликованы три доклада П. Н. Тверского, которые подводили итог работ за 10 лет: «Электрическое состояние низких слоев атмосферы за 10 лет наблюдений в Павловске», «К вопросу об электричестве осадков», «Новый метод измерения радиоактивности почвенного воздуха».



Сотрудники Павловской магнитно-метеорологической обсерватории.  
Во втором ряду: второй справа — П. Н. Тверской



Учебники П. Н. Тверского.

Первые результаты наблюдений за атмосфериками приводились в статьях «Результаты наблюдений за атмосферными разрядами» (1930), «Атмосферика по наблюдениям в Слуцке» (1931) и др.

Итоги работ по изучению условий распространения радиоволн и исследований ионосферы нашли отражение в докладе на конференции по изучению стратосферы (1934), опубликованном в трудах конференции и в статье «Изучение верхних слоев атмосферы методом радиоволн» (Известия АН СССР, серия географии и геофизики, № 1, 1937).

В 1921 году началась долголетняя педагогическая деятельность П. Н. Тверского. Он был приглашен ассистентом на геофизическое отделение физико-математического факультета Ленинградского университета. В то время кафедрой геофизики заведовал известный метеоролог, профессор П. И. Броунов, по инициативе которого и возникла эта кафедра. Занявшись сельскохозяйственной метеорологией П. И. Боунов в 1926 г. оставил кафедру, и на ее заведывание был назначен доцент П. Н. Тверской. В 1929—1930 гг. при разделении физико-математического факультета на физический и математический кафедра геофизики была преобразована в геофизическое отделение, вошедшее в состав физического факультета. По предложению П. Н. Тверского в 1931 г. на отделении были созданы две кафедры: физики атмосферы и земной коры. К этому времени П. Н. Тверской получил звание профессора и возглавил и отделение и кафедру физики атмосферы.

Начиная с 1923 г., П. Н. Тверской читал курс геофизики — общий и обязательный для всех студентов геофизического отделения. Параллельно с чтением лекций он начал работу по созданию учебника по геофизике. Уже в 1930 г. вышло из печати первое издание «Курса геофизики». Потребность в таком учебнике была настолько велика, что он был переиздан в 1932 и 1936 гг., а четвертое переработанное издание вышло в 1939 г. В течение нескольких десятилетий «Геофизика» П. Н. Тверского была единственной книгой такого всеобъемлющего содержания. Первые выпуски студентов-геофизиков (до 1931 г.) были малочисленны, но все же они заметно пополнили состав научных сотрудников, ставших с годами известными специалистами и деятелями науки. Из них

можно упомянуть Н. И. Леушина (выпуск 1924 г.) — видного специалиста по атмосферному электричеству, В. М. Михеля (1925 г.) — аэролога, доктора географических наук, Я. Х. Иоселева (1928 г.) — синоптика, кандидата наук, М. Е. Острекина (1930 г.) — полярника, руководителя экспедиций, Героя Советского Союза, Е. К. Федорова (1932 г.) — академика, Героя Советского Союза, выдающегося научного и общественного деятеля.

Большой заслугой П. Н. Тверского явилось создание на кафедре физики атмосферы специальной учебной лаборатории, где студенты получали навыки экспериментальной работы.

После начала Великой отечественной войны в ноябре 1941 г. часть физического факультета была эвакуирована в Елабугу. В этот период П. Н. Тверской занимался атмосферной оптикой, в частности исследованием эффекта Форбса, экспериментальным изучением электрических явлений, наблюдаемых при фазовых переходах воды, и механизмов электризации частиц, а также условий возникновения статических зарядов в ткацком, типографском и других производствах. Летом 1944 г., вернувшись в Ленинград, П. Н. Тверской энергично взялся за восстановление работы кафедры. Он собрал преподавателей и занялся совершенствованием учебных планов и программ. В эти годы П. Н. Тверской вернулся к наиболее близкой ему проблеме — атмосферному электричеству. В 1949 г. вышла из печати его книга «Атмосферное электричество» — первая отечественная монография, по данному вопросу. Читавшийся на кафедре основной курс физики атмосферы был опубликован в форме коллективного учебного пособия "Курс метеорологии" (1951 г.), а в 1962 году П. Н. Тверской создал другой, более совершенный учебник того же названия. Кроме этого Павел Николаевич возобновил работы по изучению ионизации атмосферы. В 1950—1952 гг. он сконструировал счетчик ионов, который получил широкое распространение в нашей стране.

Важным направлением, которое в послевоенные годы получило развитие, стали исследования по микрофизике облаков. Программой для таких работ стала статья П. Н. Тверского «Некоторые вопросы физики облаков и осадков» (1947 г.). В дальнейшем на кафедре были

развернуты работы по физике облаков и осадков, включая активные воздействия на облака.

В послевоенные годы, как и раньше, П. Н. Тверской тесно сотрудничал с ГГО: в 1945—1950 гг. он заведовал лабораторией атмосферного электричества, а затем вплоть до 1960 г. оставался консультантом ГГО по общим вопросам физики атмосферы.

За большую научную и педагогическую деятельность П. Н. Тверской был награжден двумя орденами Ленина и многими медалями. В 1957 г. ему было присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки РСФСР.

В Павле Николаевиче Тверском сочетались качества большого ученого, организатора и педагога. Ему принадлежит около 80 работ по различным разделам геофизики, главным образом по проблемам атмосферного электричества, естественной радиоактивности, динамической метеорологии и статистических методов прогноза погоды, истории метеорологии.

Павла Николаевича Тверского уважали и любили за огромную эрудицию и широту кругозора, бесконечное трудолюбие, доброжелательность к людям и умение прийти им на помощь.

**К использованию численной модели конвективного грозового облака для изучения роли электрических сил в образовании опасных явлений погоды.** Михайловский Ю. П., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е. Синькевич А. А., Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 7—31.

Анализируются возможности использования численной нестационарной полуторамерной модели конвективного грозового облака для изучения роли электрических сил в образовании опасных явлений погоды. Описаны процессы электризации и разделения зарядов, а также механизмы влияния электрических процессов на динамику и микрофизику облака, учтенные в модели (действие электростатической силы на вертикальные воздушные потоки и на движение частиц осадков). Выполнено моделирование влияния электрических сил на интенсивность ливня и града для случая сильного градобития над Северным Кавказом. Получено, что основной вклад в электризацию облака вносит контактный механизм электризации частиц (тающая градина – облачная капля и дождевая капля – облачная капля). Учет электрических процессов для данного случая приводит к некоторому ослаблению ливня и града по сравнению со случаем отсутствия учета электричества. Для выявления более общих закономерностей необходимо выполнить цикл дополнительных исследований для разных случаев и провести дополнительную корректировку схем параметризации осадкообразования и электризации.

*Ключевые слова:* конвективное облако, модель, электризация, заряд, электрическое поле, ливень, град.

Табл. 2. Ил. 6. Библ. 23.

УДК 551.576+551.594(470.2)

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

В статье рассмотрены результаты самолетного эксперимента по исследованию группы конвективных облаков на ранней стадии развития. Для расчета напряженности электрического поля и заряда самолета использовалась методика, основанная на компьютерном моделировании. Проведен анализ связей и закономерностей между такими характеристиками, как напряженность электрического поля, заряд самолета, водность, скорость восходящих потоков, перегревом облака.

Напряженность электрического поля в исследованных конвективных облаках в среднем составила  $-92$  В/м при минимуме  $-320$  В/м, среднее значение заряда самолета было равно  $-4,1 \cdot 10^{-6}$  Кл при минимуме в  $-9,9 \cdot 10^{-6}$  Кл. Абсолютная величина напряженности электрического поля и заряда самолета возрастает с увеличением водности в облаке.

*Ключевые слова:* напряженность электрического поля, летательный аппарат, заряд, конвективные облака, водность.

Табл. 2. Ил. 7. Библ. 18.

УДК 551.584

**Некоторые результаты исследования процесса слияния конвективных ячеек над территорией Ленинградской области.**

Колбин В. А., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., Солонин А. С. Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 47—55.

В статье рассмотрен процесс объединения конвективных облаков над территорией Ленинградской области. Выполнен анализ изменения радиолокационных характеристик, полученных с помощью ДМРЛ «Пулков»». Показано, что в облаке, образованном в результате слияния конвективных ячеек, увеличиваются водность, высота максимального радиозоха, площадь осадков, радиолокационная отражаемость. Установлено увеличение площади осадков в среднем вдвое.

*Ключевые слова:* облака, конвективные ячейки, слияние, радиолокационные характеристики.

Ил. 5. Библ. 7.

УДК 551.576+551.594(470.2)

**Заряд капель воды при испарении и конденсации.** Шавлов А. В., Джуманджи В. А., Яковенко А. А. Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 56—78.

Предложен механизм электризации воды и льда при испарении (конденсации). Показано, что при испарении носители заряда воды - протоны и гидроксид-ионы накапливаются на фазовом фронте, а при конденсации истощаются. Диффузия носителей приводит к межфазному разделению заряда. На разделение заряда влияет двойной электрический слой, создаваемый ориентационными дефектами на поверхности воды, льда. Рассчитаны зависимости напряженности электрического поля на плоской поверхности воды и льда от скорости фазового превращения. Выполнены оценки электрического заряда капель воды сферической формы при различной напряженности поля и различных радиусах капель.

*Ключевые слова:* вода, лед, испарение, конденсация, разделение заряда, уравнение Пуассона.

Ил. 6. Библ. 23.

УДК 551.58:001.891.57

**Радиационные и температурные индексы (метрики) современных антропогенных изменений климата.** Кароль И. Л., Киселев А. А. Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 79—95.

Наряду с хорошо известной и широко используемой метрикой «Радиационное воздействие (форсинг)» от изменения содержания в атмосфере радиационно активных примесей, рассмотрена метрика реакции климатической системы на это воздействие (Отклик на Форсированный Режим (FRR)). Эти метрики служат количественными характеристиками степени внешнего (антропогенного) воздействия на климатическую систему в атмосфере и её отклика на различные формы внешнего воздействия. Для такого сравнения и оценок FRR предлагается воспользоваться в первом приближении простейшим уравнением баланса энергии. Обе эти метрики и эффекты их сезонных изменений на современную тропосферу средних и высоких широт рассматриваются на простых моделях.

*Ключевые слова:* численные оценки отклика климатической системы на антропогенное воздействие, уравнение баланса энергии, сезонные колебания содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере, сезонное таяние арктического морского льда.

Табл. 5. Библ. 18.

УДК 613.95

**Простой метод получения микропотоков газов для контроля погрешности методик количественного химического анализа воздуха (на примере формальдегида, фтористого водорода и фенола).** Вольберг Н. Ш., Успенский А. А., Гуревич И. Г., Степаков А. В. Труды ГГО. 2018. Вып. 587. С. 96—104.

Разработан метод получения микропотоков газов при анализе количественного химического состава атмосферного воздуха такими приоритетными компонентами как формальдегид, фтористый водород, фенол. Очевидным преимуществом является доступность применения и простота при проведении работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха.

*Ключевые слова:* дозирование, микроколичества газов.

Табл. 3. Ил. 1. Библ. 7.

УДК 551.501

**О контроле осадков из конвективных облаков по радиолокационным параметрам.** Кашлева Л. В., Нго Динь Хи, Михайловский Ю. П. Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 105—115.

Предложен способ контроля осадков на расстоянии 90-180 км от дождя по радиолокационным параметрам конвективных облаков. Выполнен анализ радиолокационных характеристик, полученных с помощью МРЛ-5 в Воейково за период 2006-2009гг. Показано, что интенсивность ливневых осадков можно контролировать по значениям отражаемости облака на уровне нулевой изотермы и толщины переохлажденной зоны.

*Ключевые слова:* радиолокация, радиолокационные параметры, атмосферные осадки, интенсивность осадков, нулевая изотерма, толщина переохлажденной зоны.

Ил. 4. Библ. 8.

УДК 551.594

**Годовые вариации напряженности электрического поля атмосферы и полярных электрических проводимостей воздуха по данным измерений на станции Восток.** Соколенко Л. Г., Стерхов П. Л. Труды ГГО, 2017. Вып 587. С. 116—124.

Представлены среднемесячные значения параметров атмосферного электричества для условий хорошей погоды на Антарктической станции Восток за 1989 – 1990 г.г., полученные в период 34 Советской антарктической экспедиции. Выполнено их сравнение с многолетними аналогичными данными в регионе Санкт-Петербурга. Выделены годовые вариации атмосферно-электрических характеристик, характерные для обоих полушарий.

*Ключевые слова:* атмосферно-электрические характеристики, напряженность электрического поля атмосферы, положительная электрическая проводимость воздуха, отрицательная электрическая проводимость воздуха, среднемесячные значения.

Ил. 3. Библ.4

УДК 551.521.31

**Косвенные методы расчета суммарной солнечной радиации для оценки гелиоэнергетических ресурсов региона на примере Якутии.** Трофимова О. В., Задворных В. А. Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 125—136.

Рассматривается сравнение результатов расчета суммарной солнечной радиации различными косвенными методами с данными наблюдений, а также возможность использования данных спутниковой информации.

Приводятся карты распределения годовых сумм суммарной радиации по территории Якутии, рассчитанных косвенными методами, по данным наблюдений и по данным спутниковой информации (база данных NASA SSE).

*Ключевые слова:* суммарная солнечная радиация, косвенные методы расчета, база данных NASA SSE.

Табл. 4. Ил. 4. Библ. 14.

УДК 551.52

**Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы в Приморье по наземным и спутниковым данным.** Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л. Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 137—152.

Представлен анализ временных изменений АОТ атмосферы на территории Дальнего Востока, выполненный по данным актинометрических станций Росгидромета, данным сети AERONET и спутниковыми наблюдениям. Показано, что экстремально высокие значения аэрозольной мутности (суточные, месячные) формируются под влиянием местных условий и под воздействием трансграничного переноса воздушных масс с территории Монголии, северо-восточного Китая а также со стороны океана.

Установлены различия в годовом ходе АОТ, обусловленные особенностями расположения отдельных станций. Выделены два типа годового хода: для станций, расположенных на побережье и внутри материка.

*Ключевые слова:* аэрозольная оптическая толщина, сеть AERONET, спутниковые наблюдения, временные и пространственные изменения.

Табл. 3. Ил. 6. Библ. 18.

УДК. 504+551.58.910.3

**Анализ причин возникновения пожаров в Красноярском крае и их связи с метеорологическими параметрами.** Мазуров Г. И., Акселевич В. И. Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 153—172.

Анализируются возможные причины возникновения пожаров по гидрометеорологическим условиям в тайге Красноярского края на примере трех метеостанций за период 1992—2014 гг. Рассматривается 8 рабочих гипотез причин возникновения пожаров. Установлено уменьшение числа пожаров при выпадении дождя, замечено, что сильный ветер и засушливый период способствуют быстрому распространению лесных пожаров.

Поддерживается гипотеза группы ученых Московского государственного областного университета о стимулировании возникновения пожаров в лесных массивах за счет выделения метана и сопутствующих газов из болот и почвы с низкой температурой самовоспламенения.

Даются некоторые практические рекомендации по предотвращению возникновения пожаров в тайге и их тушению. В частности рекомендуется вызывать дожди путем активных воздействий на облака, в том числе и ресурсные.

*Ключевые слова:* лесной пожар, горимость, метан, самовозгорание, засуха, ресурсные облака, вызывание осадков

Табл. 4. Ил. 11. Библ. 20.

УДК 551.581.1

**Проверка модели влажности воздуха в северном полушарии (ГОСТ 26352-84) на основе аэрологических данных.** Березина М. А., Волобуева О. В., Дробжева Я. В., Дробжев В. И. Труды ГГО. 2017. Вып. 587. С. 173—203.

Представлены результаты совместного анализа среднемесячных высотных профилей массовой доли влаги для долгот, близких к 0° в. д., 80° в. д. и 80° з. д., 180° з. д. за июль и январь 2011—2013 гг. и профилей массовой доли влаги, построенными по эмпирической модели ГОСТ 26352-84.

*Ключевые слова:* высотный профиль, массовая доля влаги, экспериментальные значения, модель.

Табл. 9. Ил. 12. Библ. 3.

**Профессор К.С. Шифрин — основоположник пассивной СВЧ-микроволновой радиометрии (радиотеплолокации).** Мелентьев В. В. Труды ГГО. 2018. Вып. 587. С. 204—227.

Приводятся воспоминания о выдающемся российском ученом профессоре Кусизле Соломоновиче Шифрине, работавшим в послевоенные годы в Отделе радиационных исследований ГГО им. А.И. Воейкова и ставшим основоположником нового метода аэрокосмической дистанционной диагностики параметров состояния системы «Земля-атмосфера». Отмечается, что приоритет теоретических разработок проф. Шифрина в области СВЧ микроволновой радиометрии (радиотеплолокации) практически забыт у нас в стране, но признается ведущими специалистами в области ДЗЗ на западе. Рассказывается о творческой лаборатории ученого, о его преданности науке и высоких человеческих качествах, рассказывается о его учениках и коллегах, с которыми проф. Шифрин трудился во славу отечественной науки в стенах ГГО. Автор был аспирантом проф. Шифрина и многие годы взаимодействовал с ним в области развития и совершенствования методов и средств пассивной СВЧ радиометрии и создания новых аэрокосмических технологий в интересах практического их использования в гидрометеорологии, океанологии и спутниковом земледении.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, оптика атмосферы, гидрооптика, система «Земля-атмосфера», радиояркая температура, микроволновый радиометр, космическая метеорология, спутниковое земледение.

**To the use of numerical model of thunderstorm to study the role electrical forces in formation of dangerous weather phenomena.** Mikhailovsky Yu. P., Dovgaluk Yu. A., Veremey N. E., Sinkevich A. A. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 7—31.

Possibilities of using of a numerical non-stationary one-and-half-dimensional thunderstorm model for studying the role of electrical forces in formation of dangerous weather phenomena are analyzed in the article Processes of electrification and charge separation and also mechanisms of affect of electrical processes on cloud dynamics and microphysics are described. Electrostatic force impact on cloud updrafts (downdrafts) and precipitation particles movement are considered in the model. The simulation of electrical forces affect on shower and hail intensity was performed for one case of severe hail at the Northern Caucasus. It is obtained that contact mechanism of particles electrification (melting hailstone – cloud droplet, rain drop – cloud droplet) play the greatest role in cloud electrification. Consideration of electrical processes causes some decrease of shower and hail intensity. To retrieve more common regularities it is necessary to perform some additional investigations for various cases and to carry out modification of parameterization schemes of precipitation formation and electrification.

*Keywords:* convective cloud, model, electrification, charge, electric field, shower, hail.

Tab. 2. Fig. 6. Ref. 23.

**Aircraft studies of the electric field strength and aircraft charge in convective clouds at the early stage of development.** Torgunakov R. E., Mikhailovskiy V. Yu., Sinkevich A. A. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 32—46.

The paper describes results of an aircraft experiment of the study of a group of convective clouds at an early stage of development. To calculate the electrical field strength and aircraft charge authors use a computer modeling technique. The analysis of relationships and patterns between such characteristics as the electrical field strength, the aircraft charge, LWC, the updrafts velocity, and the overheating is carried out.

The electrical field strength in the investigated clouds was equal to  $-92$  V/m (minimum  $-320$  V/m) on average, mean value of aircraft charge was equal to  $-4,1 \cdot 10^{-6}$  C (minimum  $-9,9 \cdot 10^{-6}$  C). Absolute value of electrical field strength and aircraft charge increases with the increase of LWC.

*Keywords:* electrical field strength, aircraft, charge, convective clouds, liquid water content.

Tab. 2. Fig. 7. Ref.18.

**Some results of the investigation of the process of mergers of convective cells over the territory of the Leningrad region.** Kolbin V. A., Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S., Simakina T. E., Solonin A. S. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 47—55.

The article discusses the process of combining convective clouds over the Leningrad Region territory. The analysis of changes in radar characteristics obtained with the help of Doppler radar "Pulkovo" is performed. It is shown that in the cloud formed as a result of confluence of convective cells, the water content, the height of the maximum radio-echo, the area of precipitation, radar reflectivity increase. An increase in the area of precipitation is found to be on average twice.

*Keywords:* clouds, convective cells, the process of combining, radar characteristics.

Fig. 5. Ref. 7.

**Charge of drops of water at evaporation and condensation.** Shavlov A. V., Dzhumadzhi V. A., Yakovenko A. A. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 56—78.

The mechanism of electrization of water and ice at evaporation (condensation) is offered. It is shown that at evaporation water charge carriers - protons and hydroxide ions collect on the phase front, and at condensation are exhausted. Estimates of electric charge of water drops of spherical shape at various radiuses of drops are executed.

*Keywords:* Water, Ice, Evaporation, Condensation, Charge Separation, Poisson's Equation.

Fig. 6. Ref. 23.

**Radiative and temperature indices (metrics) of modern anthropogenic climate changes.** Karol I, L., Kiselev A. A. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 79—97.

The FRR (Forced Regime Response) metric that is aimed to estimation of the climate system response to radiatively active atmospheric species content changes is considered together with well known Radiative Forcing index. These metrics characterise the both extern (anthropogenic) impact on climate system in the atmosphere and of its response on various external impacts. The single energy balance equation is used as first approximation for FRR estimates. The both above metrics and their seasonal variations in the modern troposphere of mid and high northern latitudes are considered with simple models.

*Keywords:* quantitative estimates of climate system response on anthropogenic impact, energy balance equation, seasonal changes of atmospheric CO<sub>2</sub> content, seasonal thawing of Arctic sea ice.

Tab. 5. Ref. 18.

**A simple method for obtaining microflows of gases to control the errors in quantitative chemical air analysis techniques (for example, formaldehyde, hydrogen fluoride and phenol.** Vollberg N. Sh., Uspenski A. A., Gurevich I. G., Stepakov A. V. Proceedings of MGO. 2018. V. 587. P. 94—104.

A method has been developed for obtaining microflows of gases when analyzing the quantitative chemical composition of atmospheric air with such priority components as formaldehyde, hydrogen fluoride, phenol. An obvious advantage is the availability and simplicity in the work on air pollution control

*Keywords:* dosing, microquantities of gases.

Tab. 3. Fig. 1. Ref. 7.

**About control of convective clouds precipitation using radar parameters.** Kashleva L. V., Ngo Dinh Hu, Mikhailovskii Yu. P. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 105—115.

The article presents the method of control of precipitation intensity using radar parameters of convective clouds at the distance of 90-180 km from radar. The analysis of radar characteristics obtained with the help of MRL-5 in Voeikovo during 2006-2009 is performed. It is shown that precipitation intensity may be controlled by means of the radar reflectivity at the level of zero isotherm and of the thickness of supercooled layer.

*Keywords:* meteorological radar methods, radar reflectivity, precipitation intensity, zero isotherm, thickness of supercooled layer.

Fig. 4. Ref. 8.

**Annual variations in tension of the electrical field of the atmosphere and the polar electrical conductivities for air measurement data at Vostok Station.** Sokolenko L. G., Sterkhov P. L. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 116—124.

Presents monthly averages of atmospheric electricity parameters for good weather conditions at the Antarctic Vostok Station for 1989-1990 Gg received between 34 Soviet Antarctic expedition. They compare with similar data in the region of St. Petersburg. Allocated to annual variations in atmospheric-electrical characteristics that are specific to both hemispheres.

*Keywords:* atmospheric-electrical characteristics, positive electrical conductivity of air, negative electrical conductivity of air, the monthly mean values.

Fig. 3. Ref. 4

**Indirect calculation methods of global solar radiation for assessing solar energy resources of a region on the example of Yakutia.** Trofimova O. V., Zadvornykh V. A. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 125—136.

The work considers the comparison of global solar radiation calculated by the various indirect methods with observations data, as well as the possibility of using of the satellite data information.

The maps of the annual global solar radiation calculated by indirect methods, based on observation data and satellite information (NASA SSE database) on the territory of Yakutia are presented.

*Keywords:*. global solar radiation, indirect calculation methods, NASA SSE database.

Tab. 4. Fig. 4. Ref. 14.

**Spatio-temporal variability of the aerosol optical thickness of the atmosphere in Primorye by terrestrial and satellite data.** Plakhina I. N., Pankratova N. V., Makhotkina E. L. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 137—152.

The analysis of temporal changes in the AOT atmosphere in the territory of the Far East, performed according to the data of actinometric stations of Roshydromet, data of the AERONET network and satellite observations is presented. It is shown that extremely high values of aerosol turbidity (daily, monthly) are formed under the influence of local conditions and under the influence of transboundary transport of air masses from the territory of Mongolia, northeastern China and also from the ocean.

Differences were determined in the annual course of AOT, due to the peculiarities of the location of individual stations. Two types of annual progress are distinguished: for stations located on the coast and inside the continent.

*Key words:* aerosol optical thickness, AERONET network, satellite observations, temporal and spatial changes.

Tab. 3. Fig. 6. Ref. 18

**Analysis of the causes of fires in the Krasnoyarsk Territory and their relationship to meteorological parameters.** Mazurov G. I., Akselevich V. I. Proceedings GGO. 2017. V. 587. P. 153—172.

The possible causes of fires in hydrometeorological conditions in the taiga of the Krasnoyarsk Territory are analyzed statistically by the example of three weather stations for the period 1992-2014. 8 working hypotheses of causes of fires are considered. Clear dependence on these conditions is not revealed. Only a decrease in the number of fires in case of rain has been established. Therefore, it is recommended to call it by active influences on clouds, including resource ones. In addition, it is noted that a strong wind and a dry period contribute to the rapid spread of forest fires.

The hypothesis of a group of scientists of the Moscow State Regional University on stimulating the occurrence of fires in forest tracts is supported by the separation of methane and associated gases from bogs and soils with a low autoignition temperature. It is planned to conduct further research in this direction.

Some practical recommendations are given to prevent the occurrence of fires in the taiga and their suppression.

*Key words:* forest fire, burning, methane, spontaneous combustion, drought, resource clouds, precipitation

Tab. 4. Fig. 11. Ref. 20.

**Examination of the model of air humidity in the Northern Hemisphere, All Union State standard 26352-84 on the ground of aerological data.** Berezina M. A., Volobueva O. V., Drobzheva Y. V., Drobzhev V. I. Proceedings of MGO. 2017. V. 587. P. 173—203.

Results of the joint analysis of average monthly height profiles of the mass humidity fraction for longitudes close to 0° e.l., 80° e.l. and 80° w.l., 180° w.l. for July and January 2011-2013, and height profiles of the mass humidity fraction, builded in accordance with the empirical model of the All Union State standard 26352-84, are represented.

*Keywords:* Height profile, mass humidity fraction, experimental value, model.

Tab. 9. Fig. 12. Ref. 3.

**Professor Kusieli S. Shifrin as a pioneer of passive microwave radiometry.**  
Melentyev V. V. Proceedings of MGO. 2018. V. 587. P. 204—230.

The paper contains reminiscences about scientific activity of outstanding Russian scientist professor/ Kusieli S. Shifrin who was working at the Voeikov Main Geophysical Observatory (department of investigation of solar radiation) who had suggested new methodology of the retrieving different meteorological parameters of the system “Earth-atmosphere” with using passive microwave remote sensing. As result he stayed a world-wide recognized founder of new direction in space meteorology and oceanography. High priority of these pioneer investigations represents great achievement of Russian domestic science. The paper contains also the description of the “creative laboratory” of scientist, his character and different interests in cultural life of Russia, including poetry as well relation with colleagues and apprentices

The author of reminiscence was a PhD student of prof Shifrin and collaborated with him many years for further development new contemporary technologies practical application of the satellite microwave survey in geophysics.

*Keywords:* remote sensing, atmospheric optics, hydro-optics, brightness temperature, passive microwave radiometry, space meteorology, satellite oceanography.

Сборник научных трудов  
**Труды ГГО. Вып. 587**

Подписано в печать 25.02.18. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 15,75. Тираж 300 экз. Заказ №5877.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ». 195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28Ц, оф. 1Н.