

Федеральная служба  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. Воейкова

Выпуск

**560**

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

Санкт-Петербург  
2009

---

Адрес: 194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Телефон: (812) 297 43 90

ФАКС: (812) 297 86 61

e-mail: [director@main.mgo.ri.ru](mailto:director@main.mgo.ri.ru)

web site: <http://www.mgo.rssi.ru>

УДК 551.5(09)

*Редакционная коллегия*

д-р физ.-мат. наук В. М. Катцов; д-р физ.-мат. наук Е. Л. Генихович;  
канд. физ.-мат. наук А. С. Зайцев; д-р физ.-мат. наук, профессор И. Л. Кароль;  
д-р геогр. наук, профессор Н. В. Кобышева; д-р физ.-мат. наук В. П. Мелешко;  
д-р геогр. наук А. В. Мещерская; д-р физ.-мат. наук, профессор О. М. Покровский;  
д-р тех. наук, профессор В. Д. Степаненко; д-р физ.-мат. наук, профессор Г. Г. Шукин;  
канд. физ.-мат. наук С. С. Чичерин;  
канд. геогр. наук Е. Л. Махоткина (секретарь редколлегии)

Содержатся результаты теоретических и экспериментальных исследований по современным 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.

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

*Editorial board*

Dr. V. M. Kattsov, Dr. E. L. Genihovich, Dr. A. S. Zaitsev, Dr. I. L. Karol,  
Dr. N. V. Kobysheva, Dr. V. P. Meleshko, Dr. A. V. Mescherskaya,  
Dr. O. M. Pokrovsky, Dr. V. D. Stepanenko, Dr. G. G. Shchukin,  
Dr. C. C. Chicherin, 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.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| <i>В. М. Мирвис, В. П. Мелешко, В. М. Гаврилина, В. А. Матюгин, Т. Ю. Львова.</i> Воспроизводимость Североатлантического колебания по результатам гидродинамических прогнозов на месяц и сезон, его предсказуемость и связь с качеством прогнозирования аномалий температуры воздуха на территории России..... | 7   |
| <i>И. Л. Кароль, В. А. Фролькис, А. А. Киселев.</i> Радиационный и термический режим атмосферы и климатическая система: индексы внешнего воздействия и их оценка .....   | 33  |
| <i>Н. В. Кобышева.</i> Современное состояние и перспективы развития работ в области прикладной климатологии.....   | 51  |
| <i>Л. А. Хандожко, А. Г. Тимофеева.</i> Экономическая полезность использования метеорологических прогнозов в теплоэнергетике Москвы.....   | 68  |
| <i>Г. Б. Пигольцина.</i> Обоснование необходимости и принципы учета мезо- и микроклимата при комплексных оценках природных ресурсов с учетом различных отраслей экономики .....  | 89  |
| <i>П. Ф. Свистов, А. И. Полищук, Н. А. Першина.</i> Фоновый уровень состояния атмосферы по многолетним данным о химическом составе атмосферных осадков .....   | 116 |
| <i>Г. Г. Щукин, В. Д. Степаненко, С. П. Образцов, Д. М. Караваев, В. Ю. Жуков, Ю. В. Рыбаков.</i> Состояние и перспективы радиофизических исследований атмосферы и подстилающей поверхности .  | 143 |
| <i>А. А. Синькевич, Ю. А. Довгалюк, В. Д. Степаненко, Н. Е. Веремей, Н. Н. Волков, А. Б. Куров, Л. В. Пивоварова.</i> Некоторые аспекты исследования конвективных облаков и осадков .....  | 168 |
| <i>С. М. Гальперин, В. Н. Козлов, В. Д. Степаненко, Г. Г. Щукин.</i> Активные воздействия на облачные системы с целью регулирования осадков и молниевой активности .....   | 189 |
| <i>В. Н. Морозов, И. Б. Попов, А. В. Снегуров, В. С. Снегуров, Л. Г. Соколенко, Я. М. Шварц.</i> Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз .....   | 213 |
| <i>В. Д. Степаненко, В. Н. Емельянова, Ю. А. Довгалюк.</i> О возможностях и особенностях радиолокационного определения интенсивности дождей с ИСЗ по ослаблению радиоволн .....  | 243 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>А. А. Соломатникова.</i> Расчет общего содержания озона при автоматизированных измерениях по радиации от зенита ясного и облачного неба..... | 255 |
| <i>П. С. Зименков.</i> Исследование датчика гололедно-изморозевых отложений .....   | 268 |
| 50 лет лаборатории химического анализа атмосферных осадков....  | 277 |
| Валентин Петрович Мелешко. К 75-летию со дня рождения .....   | 285 |
| Александр Сергеевич Зайцев. К 70-летию со дня рождения .....  | 289 |
| Марк Евсеевич Берлянд. К 90-летию со дня рождения .....   | 291 |
| Памяти Семена Михайловича Гальперина.....   | 299 |

## CONTENTS

|   |     |
|---|-----|
| <i>V. M. Mirvis, V. P. Meleshko, V. M. Gavrilina, V. A. Matyugin, T. Yu. Lvova.</i> Reproducibility of the North Atlantic Oscillation as derived in the monthly and seasonal forecasts, and its predictability and connection with quality of air temperature anomalies forecasts in Russia ..... | 7   |
| <i>I. L. Karol, V. A. Frolkis, A. A. Kiselev.</i> Radiative and thermal atmospheric regimes and climate system: indices of external impact and their evaluation. ....   | 33  |
| <i>N. V. Kobysheva.</i> Current status and prospects for the development of applied climatology.....  | 51  |
| <i>L. A. Handogko, A. G. Timofeeva.</i> Economical profit of use of meteorological forecasts in heat-and-power engineering of Moscow .....  | 68  |
| <i>G. B. Pigoltsina.</i> Substantiation of the importance of meso- and microclimatic information accounting in nature resources complex estimations for different economic branches .....   | 89  |
| <i>P. Ph. Svistov, A. I. Polischuk, N. A. Pershina.</i> Background level the state of the atmosphere on the data on chemical precipitation .....  | 116 |
| <i>G. G. Shchukin, V. D. Stepanenko, <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">S. P. Obratsov</span>, D. M. Karavaev, V. Y. Zhukov, Y. V. Rybakov.</i> Condition and prospects of radiophysical researches of an atmosphere and surface.....   | 143 |
| <i>A. A. Sinkevich, Yu. A. Dovgaljuk, V. D. Stepanenko, N. E. Veremey, N. N. Volkov, A. B. Kurov, L. V. Pivovarova.</i> Some aspects of convective cloud and precipitation investigation.....   | 168 |
| <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">S. M. Galperin</span> , <i>V. N. Kozlov, V. D. Stepanenko, G. G. Shchukin.</i> Active influences on cloud systems with the purpose of regulating precipitation and lightning activity .....  | 189 |
| <i>V. N. Morozov, I. B. Popov, A. V. Snegurov, V. S. Snegurov, L. G. Sokolenko, Ya. M. Schwarts.</i> Investigation of the electrical processes in atmosphere and pelengation of thunderstorms .....   | 213 |
| <i>V. D. Stepanenko, V. N. Emeljanova, Yu. A. Dovgaljuk.</i> On the possibilities and features of radar rain intensity estimation by radio wave attenuation.....  | 243 |
| <i>A. A. Solomatnikova.</i> Total ozone calculation for automated measurements by blue and cloudy sky zenith .....  | 255 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>P. S. Zimenkov. An analysis of glaze-ice and rime deposition probe ...</i>    | 268 |
| 50 yeas of laboratory of chemical analysis of an atmospheric precipitation ..... | 277 |
| Valentin Petrovich Meleshko .....  | 285 |
| Aleksandr Sergeevich Zaitsev.....  | 289 |
| Mark Evseevich Berlyand .....  | 291 |
| In memory Semen Mihaylovich Galperin .....                                       | 299 |

УДК 551.509

**ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОГО  
КОЛЕБАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ПРОГНОЗОВ НА МЕСЯЦ И СЕЗОН,  
ЕГО ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ И СВЯЗЬ  
С КАЧЕСТВОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АНОМАЛИЙ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

*В. М. Мирвис, В. П. Мелешко, В. М. Гаврилина,  
В. А. Матюгин, Т. Ю. Львова*

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

Поступила в редакцию 27.04.2009

**Введение**

Североатлантическое колебание (САК) является одной из главных составляющих изменчивости циркуляции атмосферы в Северном полушарии и оказывает существенное влияние на погоду и климат огромной территории — от восточного побережья Северной Америки на западе до восточной оконечности Северной Евразии на востоке. САК связано с перераспределением атмосферных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой. Пространственные особенности и временная изменчивость САК обычно определяются по полю давления на уровне моря (SLP), для которого существует длительный ряд инструментальных наблюдений. Положительная фаза САК характеризуется повышенным, а отрицательная — пониженным градиентом атмосферного давления между азорским максимумом и исландским минимумом.

Для описания временной динамики САК используются различные индексы. Наибольшее распространение получили индексы, рассчитываемые по рядам атмосферного давления на станциях Гибралтар, Лиссабон или Понта Дельгада, характеризующих состояние азорского максимума, и станциях юго-западной Ис-

ландии (Рейкьявик/Stykkisholmur), характеризующих состояние исландского минимума (Hurrell, 1995; Jones, Jonsson, Wheeler, 1997; Osborn, 2004). При этом сам индекс рассчитывается как разность нормализованного атмосферного давления на уровне моря на двух выбранных станциях. Главное преимущество этих индексов заключается в том, что для них имеются многолетние ряды данных (с 1860-х годов и даже ранее).

Другая серия индексов основана на поиске оптимального представления пространственных структур — мод изменчивости — на основе анализа эмпирических ортогональных функций (э.о.ф) и главных компонент полей аномалий атмосферного давления в атлантическом секторе Северного полушария или над всем Северным полушарием, а также полей геопотенциала в средней тропосфере (Barnston, Livezey, 1987; Hurrell, 1995; Chen, Van den Dool, 2003). Показано, что в зимний период, когда амплитуда САК достигает максимума, эти индексы тесно коррелируют с индексами САК, основанными на данных SLP по станциям вблизи азорского и исландского центров действия атмосферы (ЦДА).

Весьма заметная роль САК в формировании зимних погодных условий на большей части России требует уделить особое внимание анализу воспроизводимости и предсказуемости САК в долгосрочных гидродинамических прогнозах на месяц и сезон. В частности, необходимо определить:

насколько адекватно воспроизводятся в прогнозах основные особенности пространственной структуры САК,

успешность прогнозов индекса САК,

зависимость успешности прогнозов температуры воздуха на территории России от состояния САК,

возможности использования фактической или прогностической информации о состоянии САК для улучшения прогнозов.

### **Использованные данные**

Анализ проводился по материалам прогностических расчетов на месяц и сезон, выполненных на основе глобальной модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) T42L14 (Шнееров, Мелеш-



ко и др., 2001), а также версии этой модели более высокого пространственного разрешения T63L14 (ГГО), с использованием в качестве исходной информации данных реанализа атмосферы за длительный период (Gibson et al., 1996; Kalnay et al., 1996).

Было рассмотрено несколько серий прогностических экспериментов.

1. Две идентичные серии сезонных прогнозов, выполненных с моделями T42L14 и T63L14 по протоколу международного эксперимента SMIP-2/HFR за 25-летний период (1979—2003 гг.). Эти серии представлены ансамблевыми прогностическими расчетами на 4 мес (ноябрь—февраль) по совокупности шести комплектов начальных данных о состоянии атмосферы за 29—31 октября со сдвигом 12 ч. Анализировались результаты 25 средних ансамблевых прогнозов на 4 мес.

2. Серия ежемесячных сезонных прогнозов по модели T42L14 на трехмесячный период за 1982—2003 гг., в которых модель стартовала от данных, соответствующих сроку 00 ч GMT, взятому со сдвигом четверо суток (96 ч) по отношению к началу каждого календарного месяца, а период интегрирования захватывал три последующих календарных месяца (скользящий сезон). Каждый прогноз включал ансамбль из семи прогнозов, шесть из которых рассчитывались от слабо возмущенных начальных полей, формируемых на основе технологии бридинга (Пичугин, Мелешко и др., 1998). В качестве окончательного рассматривался средний по ансамблю прогноз. Общий объем выборки по этой серии составляет  $12 \times 22 = 264$  средних по ансамблю прогнозов.

3. Серия ежемесячных прогнозов на месяц по модели T42L14 за период 1960—2005 гг. (45 лет). Прогнозы рассчитывались от начальных данных за 00 ч UTC последних суток, предшествующих прогностическому месяцу. Ансамбль из девяти прогнозов включал расчеты по восьми слабо возмущенным начальным полям, полученным с использованием бридинга.

Расчеты по всем трем сериям проводились в предположении сохранения начальной аномалии температуры поверхности океана (SST) в течение всего периода интегрирования. При этом ис-

пользовались начальными средними месячными значениями, а с 1982 г. (в сериях 2 и 3) — средними недельными данными SST, которые могли бы быть известны к началу прогноза при оперативной работе.

Для оценок фактического состояния САК были использованы значения индексов САК по данным сайта <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html>, рассчитанные по данным об атмосферном давлении на станциях, а также результаты анализа полей атмосферного давления над Северной Атлантикой по данным реанализа (Kanamitsu et al., 2002).

Оценки прогнозов приземной температуры воздуха на территории Североевразийского региона и России рассчитывались с привлечением данных наблюдений 70 станций, для которых составляются оперативные гидродинамико-статистические прогнозы ГГО (Мирвис, Мелешко и др., 2006а, 2006б). Расположение станций отмечено на рис. 5 и 6 точками.

### **Воспроизводимость пространственной структуры САК**

На первом этапе важно было удостовериться в том, что пространственная структура главных мод изменчивости, полученная по совокупности прогностических полей атмосферного давления над Северной Атлантикой на длительных интервалах интегрирования, адекватна реальной, соответствующей структуре САК. С этой целью было выполнено сравнение результатов разложения полей месячных и сезонных аномалий SLP в атлантическом секторе Северного полушария по э.о.ф., полученных по прогностическим и фактическим данным за 25 лет (1979—2003 гг.). При этом использовались результаты прогнозов, полученные по серии 1. В качестве эталонных фактических данных были использованы поля реанализа (Kanamitsu et al., 2002).

Прогностические и фактические поля были представлены данными в узлах регулярной сетки  $2,5 \times 2,5^\circ$  по области  $20^\circ$ — $80^\circ$  с. ш.,  $90^\circ$  з. д. —  $40^\circ$  в. д. Расчеты собственных векторов производились по матрице ковариаций для отклонений давления от средних значений (норм), рассчитанных в каждой точке по всему

25-летнему ряду. При этом нормы фактических данных оценивались по реанализу, а прогностических — по результатам прогнозов.

Анализировались результаты разложения средних месячных данных для каждого из четырех месяцев (ноябрь—февраль) отдельно и средних трехмесячных периодов (сезоны ноябрь—январь и декабрь—февраль). Заметим, что заблаговременность прогнозов увеличивается от нулевой в ноябре до трех месяцев в феврале.

Для анализа воспроизводимости пространственной структуры САК проведено сравнение пространственных распределений э.о.ф., соответствующих структуре САК, полученных по данным реанализа и прогнозов, а также вклада этих функций в суммарную дисперсию фактических и прогностических полей аномалий SLP над Северной Атлантикой. Анализ показал, что в зимние месяцы структура САК соответствует 1-я э.о.ф. (ЭОФ1), вносящая наибольший вклад в суммарную дисперсию. В ноябре по данным реанализа вклады 1-й и 2-й э.о.ф. оказались практически одинаковыми, причем пространственной структуре САК соответствовала 2-я э.о.ф. По прогностическим данным во все месяцы пространственная структура САК описывается ЭОФ1.

Для оценки геометрического подобия полей э.о.ф., соответствующих структуре САК, полученной по данным наблюдений и по результатам прогнозов, рассчитывались коэффициенты пространственной корреляции:

$$r = \frac{\sum_{i,j} \cos \varphi_i (x_{ij} - \bar{x}) \cdot (y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i,j} \cos \varphi_i (x_{ij} - \bar{x})^2 \cdot \sum_i \cos \varphi_i (y_{ij} - \bar{y})^2}},$$

где  $x_{ij}$  и  $y_{ij}$  — значения э.о.ф. в точках поля по данным модели и наблюдений,  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние полей,  $i$  и  $j$  — индексы широтно-долготной сетки,  $\varphi_i$  — широта.

Результаты, представленные в табл. 1, показывают в целом хорошее согласование полей э.о.ф., соответствующих образу САК: в большинстве случаев коэффициенты корреляции составляют 0,8—0,9. Отметим, что при наличии выборочных колебаний в отдельные месяцы в целом корреляция не снижается по мере увеличения заблаговременности прогноза.

Таблица 1

**Коэффициенты пространственной корреляции между полями э.о.ф. (образ САК), полученными по данным реанализа и по результатам прогнозов по моделям T42L14 и T63L14**

| Прогностическая модель | Период, месяцы года |      |      |      |      |        |
|------------------------|---------------------|------|------|------|------|--------|
|                        | XI                  | XII  | I    | II   | XI—I | XII—II |
| T42L14                 | 0,66                | 0,95 | 0,75 | 0,80 | 0,89 | 0,84   |
| T63L14                 | 0,79                | 0,65 | 0,90 | 0,90 | 0,92 | 0,92   |

На рис. 1 представлены результаты сравнения относительного вклада э.о.ф., соответствующих пространственной структуре САК, в суммарную дисперсию полей аномалий SLP. Из рисунка видно, что вклады, полученные по месячным полям реанализа, возрастают от 28 % в ноябре до 47 % в феврале. По данным прогнозов на основе модели T42L14 сезонный ход относительно

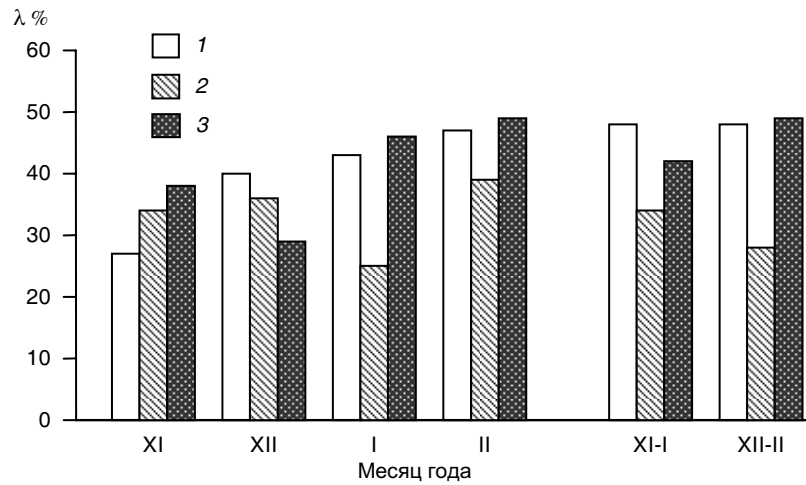


Рис. 1. Вклад  $\lambda$  (%) 1-й э.о.ф. (образ САК) в суммарную дисперсию фактических и прогностических аномалий атмосферного давления над Северной Атлантикой.

1 — данные реанализа, 2 и 3 — результаты прогнозов по моделям T42L14 и T63L14 соответственно.

вклада э.о.ф. не столь очевиден. В частности, он завышен в ноябре и занижен в остальные месяцы. Более близки к реальности оценки вкладов, полученные в прогнозах по модели T63L14 — для средних за зимний сезон полей они практически совпадают со вкладами по фактическим данным.

Полученные выводы свидетельствуют о весьма неплохой воспроизводимости пространственной структуры САК на всех рассмотренных интервалах прогноза. Этот вывод, в частности, свидетельствует о возможности использования для анализа временной изменчивости САК по результатам прогнозов и более простых индексов, основанных на вычислении разности нормализованных аномалий атмосферного давления в центрах азорского максимума и исландского минимума.

#### **Воспроизводимость параметров изменчивости индекса САК и его составляющих**

Для анализа воспроизводимости временной изменчивости индекса САК и его составляющих были использованы результаты серии 2 прогностических экспериментов, позволяющие выполнить сравнение на интервалах прогноза до трех месяцев для всех месяцев в годовом ходе. Аномалии давления в центрах действия определялись путем билинейной интерполяции из данных регулярной сетки  $2,5 \times 2,5^\circ$  в точки с заданными координатами:

1)  $\Delta P_A$  —  $37,8^\circ$  с. ш.,  $25,7^\circ$  з. д. (Ponta Delgada);

2)  $\Delta P_I$  —  $65,1^\circ$  с. ш.,  $22,7^\circ$  з. д. (Stykkisholmur).

Индекс САК определялся как разность средних месячных (сезонных) аномалий атмосферного давления вблизи центров азорского максимума ( $\Delta P_A$ ) и исландского минимума ( $\Delta P_I$ ):

$$I_{\text{САК}} = \Delta P_A - \Delta P_I.$$

Соответствующие эталонные (фактически наблюдавшиеся) значения индекса определялись аналогично по данным реанализа NCEP-DOE AMIP-II (Reanalysis-2),

Необходимо отметить, что в расчетах прогностических аномалий используются параметры модельного климата (средние прогностические значения давления за 1982—2003 гг.), а в расчетах эталонных аномалий — параметры климата по данным реанализа (средние значения давления за 1982—2003 гг.). Таким образом устраняется постоянная систематическая ошибка в результатах расчета атмосферного давления в выбранных точках и перепада давления между ними. На значения межгодовых изменений индекса это не влияет.

Результаты расчетов стандартных отклонений  $I_{\text{САК}}$  и его составляющих по фактическим и прогностическим данным, соответствующим интервалам заблаговременности 0, 1 и 2 мес (рис. 2), показывают, что годовой ход изменчивости в прогностических данных является меньшим по амплитуде, чем в реальности. В частности, существенно занижен зимний максимум изменчивости. Уже в первый прогностический месяц изменчивость для зимних месяцев оказывается приблизительно в 2 раза меньше, чем по фактическим данным, и по мере увеличения заблаговременности она продолжает уменьшаться. Это практически в равной мере относится к обоим составляющим индекса ( $\Delta P_A$  и  $\Delta P_I$ ). Отчасти это может объясняться тем, что результаты прогнозов осредняются по ансамблю и в результате сглаживается временная изменчивость, причем эффект сглаживания возрастает по мере расширения распределения ансамбля с увеличением заблаговременности прогноза. Другой причиной может быть недостаточное пространственное разрешение модели.

Отметим также относительно большую изменчивость аномалий давления в исландском минимуме по сравнению с азорским максимумом. В летние месяцы, соответствующие сезонному минимуму изменчивости САК, отношение параметров изменчивости по прогностическим данным к соответствующим фактическим значениям возрастает, а для первого прогностического месяца оно близко к единице.

Важной характеристикой САК является коэффициент корреляции между атмосферным давлением в азорском и исландском

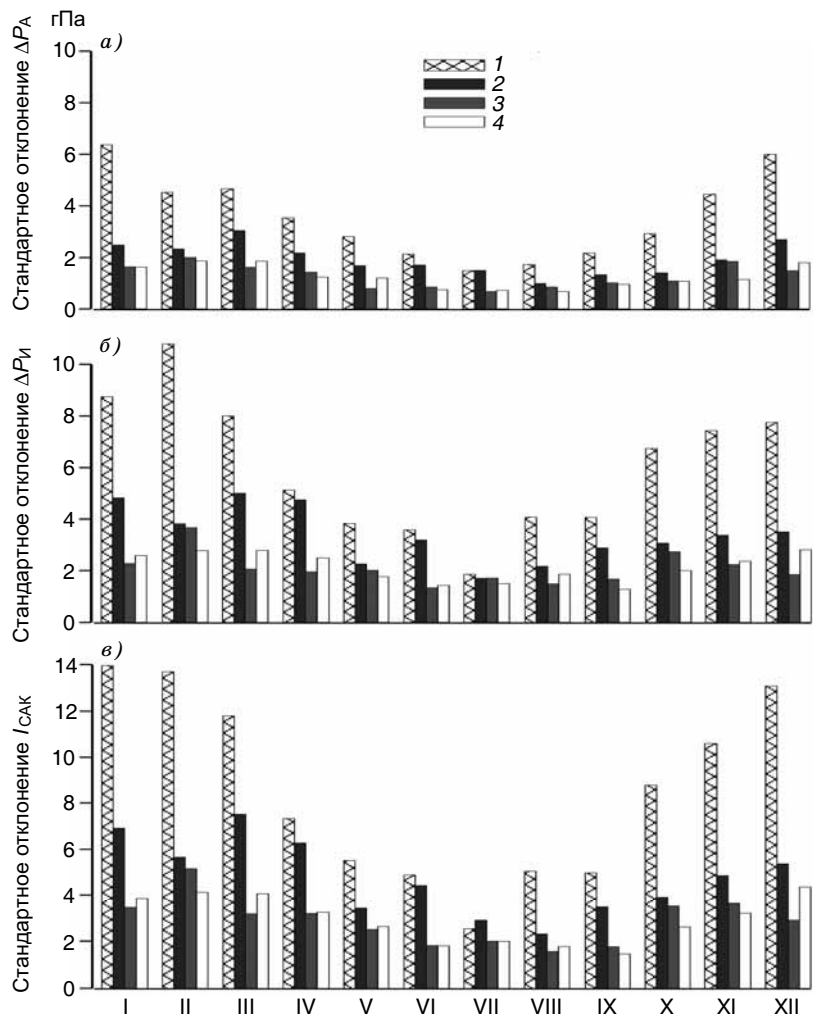


Рис. 2. Изменчивость аномалий атмосферного давления в азорском (а) и исландском (б) центрах действия атмосферы и их разности  $I_{\text{CAF}}$  (в) по фактическим и прогностическим данным (1982—2003 гг.).

1 — по данным реанализа; 2, 3 и 4 — по результатам прогнозов на 1-й, 2-й и 3-й месяцы от начала интегрирования.

центрах действия атмосферы. Собственно факт значительной отрицательной корреляции является главным свидетельством самого колебания. Для оценки адекватности отражения этой связи в модели на интервалах прогноза были рассчитаны и сопоставлены коэффициенты корреляции между аномалиями  $\Delta P_A$  и  $\Delta P_{\text{И}}$  по фактическим и прогностическим данным.

Результаты расчетов, представленные на рис. 3, показывают, что годовой ход коэффициентов корреляции по прогностическим и фактическим данным в целом согласуется хорошо и по амплитуде близок к реальному. Этот вывод касается всех интервалов заблаговременности. На рис. 3 для удобства рассмотрения ось ординат направлена в сторону увеличения отрицательной корреляции.

В числе наиболее заметных различий отметим: в апреле—июле в ряде случаев по результатам прогнозов наблюдается более выраженная отрицательная корреляция, чем по данным реанализа; в августе и сентябре, когда по данным реанализа наблюдается слабая, но все-таки отрицательная корреляция, по результатам прогнозов получены слабо положительные коэффициенты корреляции. Указанные различия приходятся на теплую половину года, когда САК выражено существенно слабее и в меньшей степени влияет на погодные процессы на территории России.

### **Прогноз приземной температуры воздуха на территории России в зависимости от САК**

Влияние САК на погоду зимнего сезона в Европе и на значительной части России хорошо известно. Некоторые сведения о связях САК и температуры воздуха в отдельных пунктах приведены в работе Смирнова, Воробьева, Качанова (1998). Наглядную иллюстрацию распределения средней аномалии температуры воздуха в Северном полушарии в декабре—марте, соответствующего положительной фазе САК, по данным за 1900—2002 гг. можно найти в подробном обзоре Hurrell et al. (2003). Распределение коэффициентов корреляции между индексами САК и аномалиями температуры воздуха на территории России по данным за 1886—2000 гг. приведено в работе Грузы, Мещерской и др. (2008). Ука-



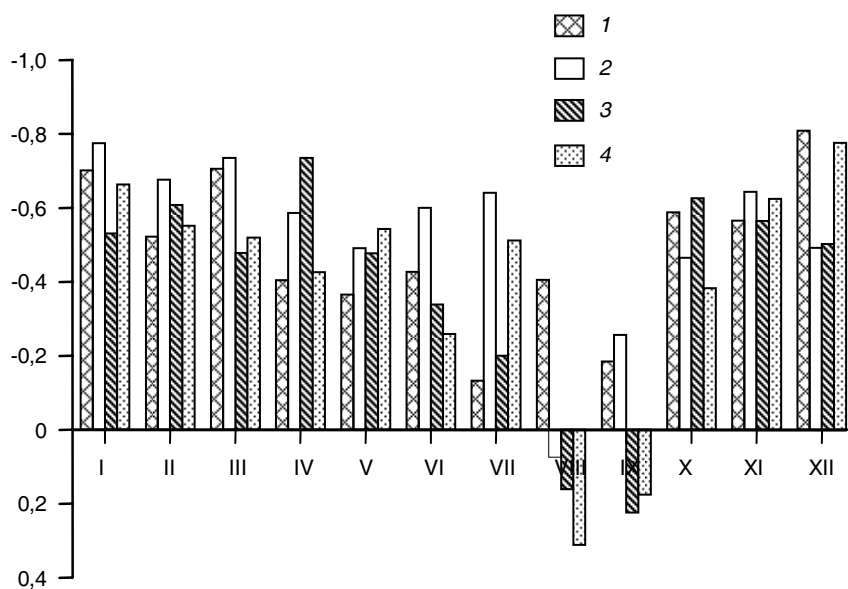


Рис. 3. Коэффициенты корреляции между давлением в азорском и исландском центрах действия атмосферы по фактическим и прогностическим данным (1982—2003 гг.).

1 — по данным реанализа; 2, 3 и 4 — по результатам прогнозов на 1-й, 2-й и 3-й месяцы от начала интегрирования.

занные источники наглядно показывают тесные связи между индексом САК и температурой воздуха, в частности на территории России.

Однако два обстоятельства препятствуют эффективному использованию этих связей в прогнозах на срок до сезона. Во-первых, состояние САК не является медленно меняющейся характеристикой — корреляция между значениями индекса в соседние месяцы значимо не отличается от нуля. Во-вторых, успешность сезонных прогнозов индексов САК пока остается низкой. Одни из последних оценок, полученных в Европейском центре среднесрочных прогнозов (ECMWF), представлены в работе Molteni (2007).

Оценки успешности прогнозов  $I_{САК}$ , полученные в результате экспериментов по сезонному прогнозу по данным серии 2 (рис. 4), показывают, что относительно успешными можно считать прогнозы САК на декабрь—март и только для 1-го месяца прогностического периода.

С учетом этого обстоятельства, а также того, что именно в зимние месяцы наблюдается наиболее сильное влияние САК на температуру воздуха в Европе и на значительной части России, дальнейшее внимание было сосредоточено на исследовании качества месячных прогнозов приземной температуры воздуха зимой в зависимости от САК.

Серия экспериментов по месячному прогнозу была продлена в прошлое с использованием данных реанализа ERA-40 (Gibson, 1996)

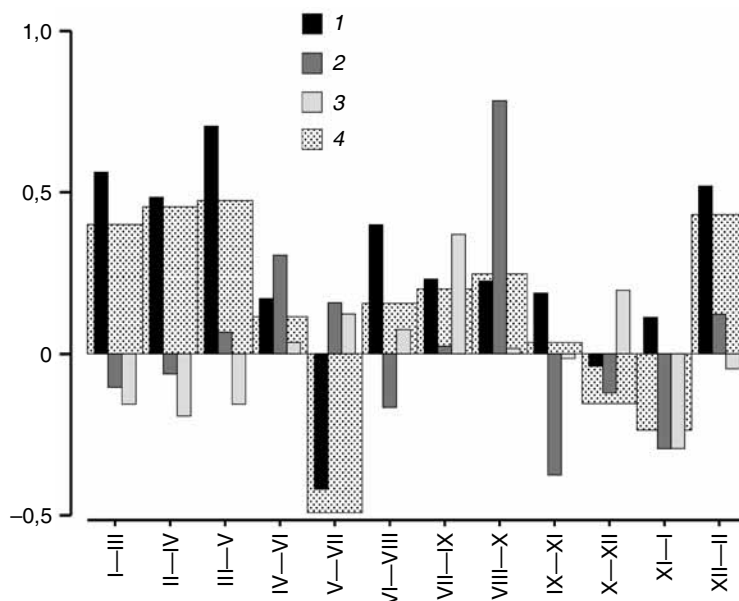


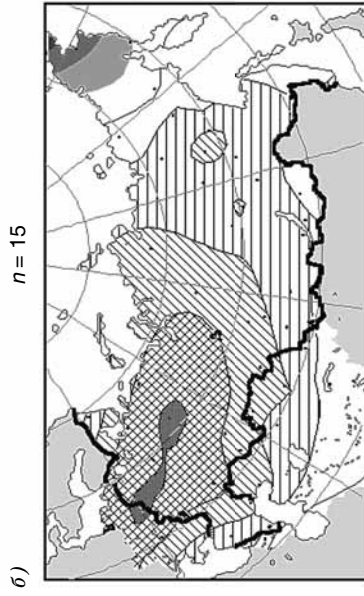
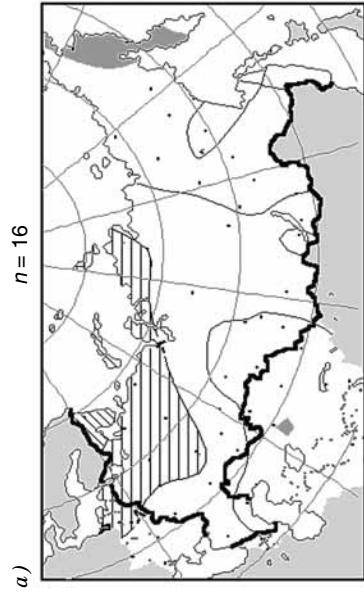
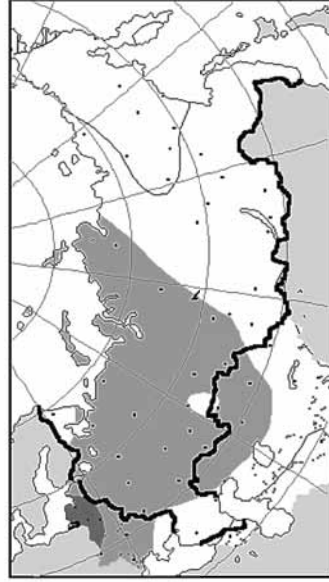
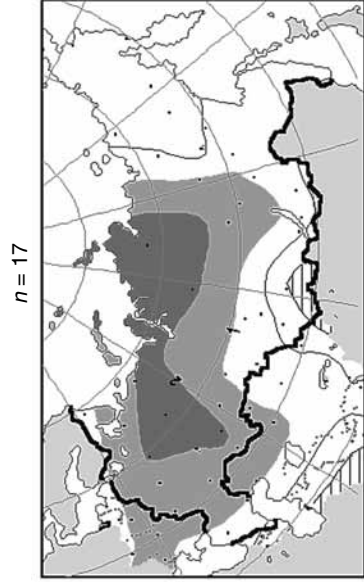
Рис. 4. Коэффициенты корреляции между рядами прогностических и фактических индексов САК (1982—2003 гг.).

1, 2 и 3 — для прогнозов на 1-й, 2-й и 3-й месяцы скользящего сезона соответственно; 4 — для сезонного прогноза.

вплоть до 1960 г. и составила в общей сложности 45 лет (серия З). Ценность этой серии по сравнению с двумя предыдущими состоит в том, что она включает период, когда велика была повторяемость отрицательной фазы САК, в то время как в период с 80-х годов прошлого столетия преобладала положительная фаза колебания. Таким образом, эта серия не только имеет больший объем (45 лет  $\times$  3 мес), но и является более представительной.

Для рассмотрения зависимости качества прогнозов приземной температуры воздуха на территории России от фазы САК для каждого месяца были определены годы, соответствующие положительной, отрицательной и нейтральной фазам САК. Классификация выполнена по месячным значениям индекса ( $I$ ), приведенным на сайте <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html>. Напомним, что данный индекс вычисляется по нормализованным аномалиям SLP на станциях Понта-Дельгада и Рейкьявик. В группу с положительной и отрицательной фазой вошли годы, для которых  $I \geq 1$  ( $I_+$ ) и  $I \leq -1$  ( $I_-$ ) соответственно; остальные годы отнесены к группе с нейтральной фазой ( $I_0$ ).

На рис. 5 приведены средние для каждой группы ошибки климатического прогноза приземной температуры воздуха на территории России и соседних стран. Из рисунка видно различие температурных условий для групп  $I_+$  и  $I_-$  в каждом из зимних месяцев. В частности, в декабре при положительной фазе САК на Северо-Западе России средние ошибки климатического прогноза составляют менее  $-1$  °С, что является следствием преобладания в эти годы положительных аномалий температуры воздуха, в среднем превышающих  $1$  °С. При отрицательной фазе отклонения в обратную сторону, превышающие по абсолютному значению  $1$  °С, охватывают почти всю европейскую часть России (ЕЧР) и север азиатской части (АЧР) вплоть до меридиана  $120^\circ$  в. д., а на северо-востоке ЕЧР и на Таймыре отклонения от нормы превышают  $2$  °С. Отметим, что разность в оценке групповых средних, превышающая  $2-3$  °С, в большинстве случаев статистически значима (вероятность нулевой гипотезы менее  $5\%$ ). Еще большие по величине и площади охвата аномалии наблюдаются в январе и феврале. При этом во все месяцы наибольшие различия в распре-



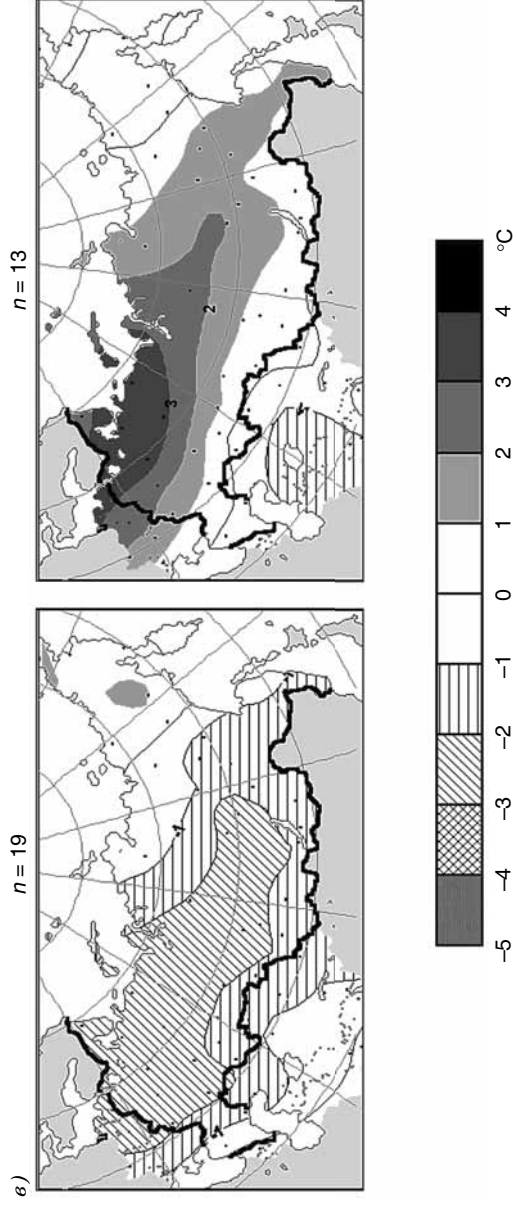


Рис. 5. Средние ошибки климатического прогноза средней месячной приземной температуры воздуха зимой при положительной (слева) и отрицательной (справа) фазе САК.

*a* — декабрь, *b* — январь, *e* — февраль; *n* — число случаев.

делении аномалий при разных фазах САК наблюдаются в западной половине территории России.

Результаты анализа качества методических прогнозов полей приземной температуры воздуха к западу от меридиана ст. Туруханск, рассчитанных по всей совокупности прогнозов на декабрь, январь и февраль в зависимости от фазы САК, представлены в табл. 2, в которой приведены значения наиболее употребительных критериев оценки прогнозов: средняя арифметическая (ME), средняя квадратическая (RMSE) и относительная (Q) ошибки, а также коэффициент корреляции полей аномалий (AC) и оценка прогноза знака аномалии ( $\rho$ ), вычисленные по трем группам, соответствующим нейтральной, отрицательной и положительной фазам САК.

В таблице также приведены  $t$ -статистика и вероятность нулевой гипотезы ( $P$ ), при которой различия оценок для групп  $I_-$  и  $I_+$  можно считать незначимыми.

Из таблицы видно, что наиболее существенным и явно неслучайным является различие средних (систематических) ошибок прогнозов ( $P \leq 0,0005$ ). Близкие к нулю систематические ошибки получены только в группе, относящейся к нейтральной фазе САК. Вероятно благодаря этому для этой группы получены относительно более низкие значения RMSE и Q.

Таблица 2

**Средние оценки прогнозов полей аномалий приземной температуры воздуха, рассчитанные по трем группам в зависимости от наблюдавшейся фазы САК для территории России к западу от ст. Туруханск**

| Критерий | $I_0$<br>$n = 34$ | $I_-$<br>$n = 46$ | $I_+$<br>$n = 50$ | $t$ -статистика | $P$           |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| ME       | -0,08             | 0,83              | -0,75             | <b>4,25</b>     | <b>0,0005</b> |
| RMSE     | 2,77              | 2,93              | 2,90              | 1,66            | 0,90          |
| AC       | 0,41              | 0,40              | 0,42              | -0,34           | 0,70          |
| $\rho$   | 0,31              | 0,36              | 0,48              | -1,56           | 0,12          |
| Q        | 0,62              | 0,81              | 0,71              | 0,69            | 0,49          |

Анализ распределения ошибок прогнозов приземной температуры воздуха по группам с положительной и отрицательной фазами САК для каждого месяца (карты не приводятся) показывает, что эти ошибки существенно меньше ошибок климатического прогноза, при том что пространственные распределения тех и других геометрически подобны. Полученный результат может быть следствием недостаточно высокого качества прогноза САК, выражающегося, в частности, в том, что амплитуда колебания по результатам прогнозов оказывается существенно меньшей, чем в реальности.

С другой стороны, учитывая то, что прогноз фазы САК зимой на срок до месяца является относительно успешным, представляет интерес исследование возможности использования прогностических значений индекса САК для уточнения прогнозов приземной температуры воздуха.

При этом могут быть использованы два подхода:

1) коррекция прогноза в предположении идеального прогноза индекса САК, основанная на учете зависимости ошибок прогноза температуры от фазы САК, установленной по фактическим значениям индекса САК;

2) коррекция прогноза на основе зависимости ошибок прогноза температуры от прогностических значений индекса САК.

Второй подход, безусловно, является предпочтительным, поскольку учитываются особенности самой модели, в частности имеющиеся в модели внутренние связи. Однако предварительно требуется убедиться в наличии значимых статистических связей между прогностическими значениями индекса САК и ошибками прогноза температуры воздуха.

Прогностические значения индексов САК ( $I^{\Pi}$ ) были рассчитаны по аналогии с индексами  $I$  по прогностическим нормализованным аномалиям атмосферного давления вблизи центров азорского максимума ( $\Delta P_A^{\Pi}$ ) и исландского минимума ( $\Delta P_I^{\Pi}$ ):

$$I^{\Pi} = \frac{\Delta P_A^{\Pi}}{\sigma_{\Delta P_A^{\Pi}}} - \frac{\Delta P_I^{\Pi}}{\sigma_{\Delta P_I^{\Pi}}}.$$

Аномалии давления в центрах действия атмосферы определялись путем билинейной интерполяции из данных регулярной сетки  $2,5 \times 2,5^\circ$ .

Затем для каждого месяца и в каждой точке были рассчитаны коэффициенты корреляции между  $I^{\text{II}}$  и ошибками прогноза температуры воздуха  $T_{\text{п}} - T_{\text{ф}}$ , где  $T_{\text{п}}$  и  $T_{\text{ф}}$  — прогностическое и фактическое значения температуры воздуха. Карты полученных коэффициентов корреляции представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что искомые связи существуют и носят вполне закономерный характер. Преобладают отрицательные коэффициенты корреляции, распространяющиеся с северо-запада и севера России в декабре на юг, а в январе и феврале на восток, покрывая при этом значительную часть России. При этом во многих районах абсолютные значения превышают стандартную ошибку коэффициента корреляции, которая составляет  $\sim 0,15$ , в 1,5—2 раза.

Пространственное распределение коэффициентов корреляции имеет некоторое сходство с распределением средних ошибок для противоположных фаз САК (см. рис. 5), но есть и заметные отличия. Так, например, в январе область выраженной отрицательной корреляции на рис. 6 сосредоточена в более южных районах, чем различия в средних ошибках на рис. 5. Максимум корреляции, достигающей по абсолютному значению 0,5—0,6, наблюдается в феврале на севере ЕЧР.

Наличие закономерной связи между прогностическими значениями индекса САК и ошибками прогноза открывает возможность более детального учета систематических ошибок при прогнозе приземной температуры воздуха и в отличие от коррекции средних ошибок без учета САК позволяет перейти к дифференцированному учету ошибок прогноза в зависимости от прогноза индекса САК.

Одним из простейших способов при этом является расчет систематических ошибок в соответствии с тремя вариантами прогноза САК: 1)  $I^{\text{II}} \leq -1$ , 2)  $-1 < I^{\text{II}} < 1$ , 3)  $I^{\text{II}} \geq 1$ . В дальнейшем при коррекции исключаются ошибки, соответствующие текущему прогнозу  $I^{\text{II}}$ .

Применение такого подхода на зависимой выборке продемонстрировало устойчивое улучшение качества прогнозов, причем,



как видно из рис. 7, в большинстве случаев наиболее ощутимо изменились к лучшему плохие прогнозы.

В табл. 3 представлены результаты сравнения средних оценок прогнозов, выполненных без учета (1) и с учетом (2) прогноза индекса САК. Оценки получены по данным 70 станций на территории России и соседних стран и осреднены для каждого месяца по данным за 45 лет (1960—2004 гг.).

Из таблицы видно, что во всех случаях второй вариант прогноза характеризуется меньшими средними квадратическими ошибками и более высокими коэффициентами корреляции аномалии. Статистическая значимость различия средних оценок выполнена на основе парного двухвыборочного критерия Стьюдента. При этом вероятность нулевой гипотезы ( $P$ ) дает основание считать улучшение прогнозов существенным. Только в одном случае при сравнении RMSE январских прогнозов различие оказалось статистически незначимым, вероятно, по причине большой изменчивости.

Полученный результат вселяет надежду на возможность улучшения качества месячных прогнозов на основе дифференцированного подхода к оценке и коррекции систематических ошибок в зависимости от модельного (гидродинамического) прогноза индекса САК. Рассмотренный пример представляет собой первый, пробный шаг в этом направлении. В дальнейшем предполагается провести дополнительные исследования, направленные на поиск наиболее эффективных методов решения этой задачи.

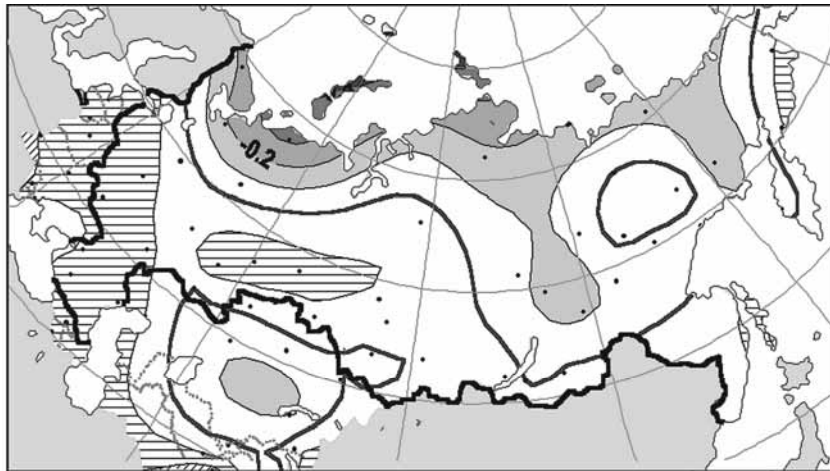
Таблица 3

Средние оценки прогнозов средней месячной температуры воздуха для двух методов коррекции систематических ошибок: без учета (1) и с учетом (2) прогноза САК

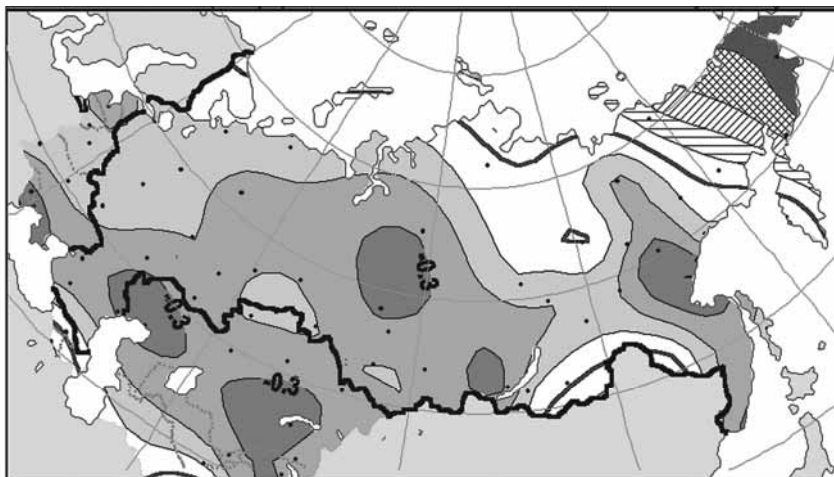
| Критерий | Декабрь |      |        | Январь |      |        | Февраль |      |        |
|----------|---------|------|--------|--------|------|--------|---------|------|--------|
|          | 1       | 2    | $P$    | 1      | 2    | $P$    | 1       | 2    | $P$    |
| RMSE     | 2,83    | 2,79 | 0,0061 | 3,14   | 3,08 | 0,1959 | 2,95    | 2,86 | 0,0268 |
| АС       | 0,43    | 0,46 | 0,0001 | 0,42   | 0,46 | 0,0092 | 0,43    | 0,47 | 0,0003 |

Примечание.  $P$  — уровень вероятности, соответствующий принятию гипотезы о равенстве средних оценок прогнозов по двум методам.

a)



b)



в)

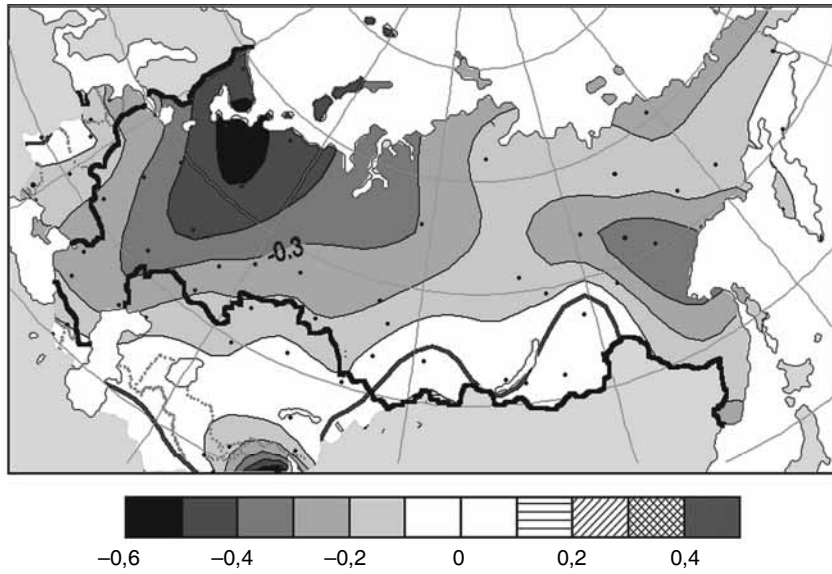
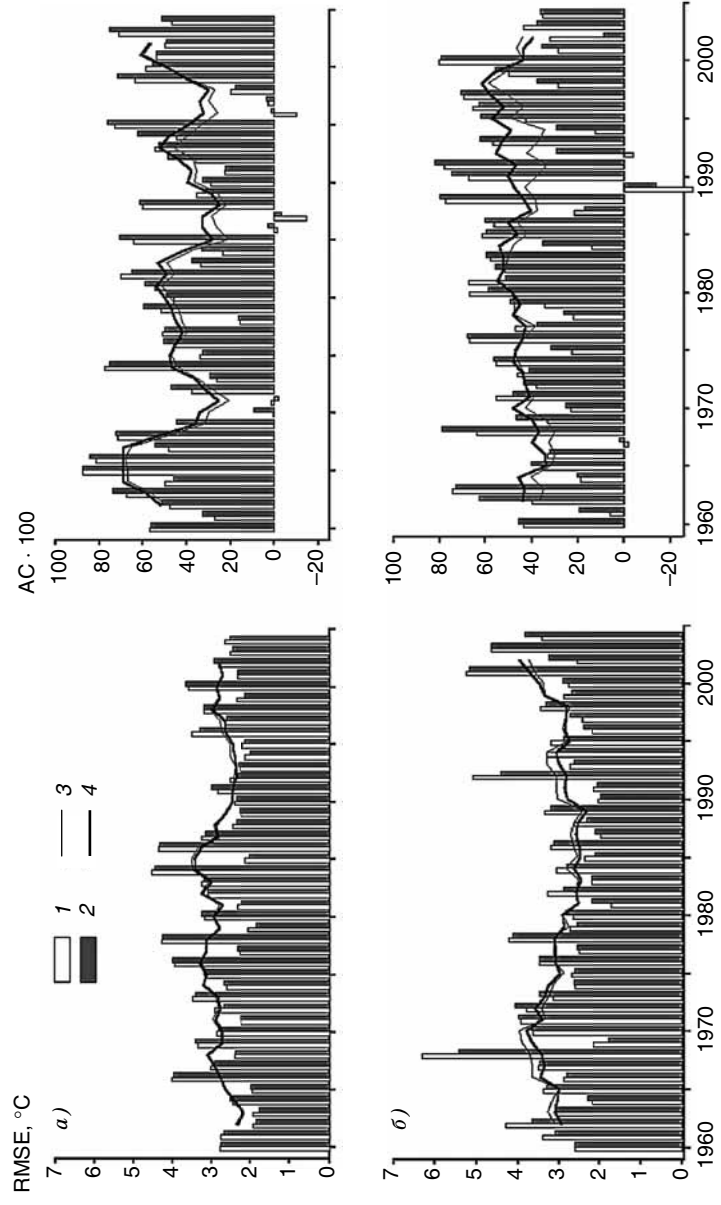


Рис. 6. Коэффициенты временной корреляции между прогностическими значениями индекса САК и ошибками прогноза средней месячной температуры воздуха.

*a* — декабрь, *b* — январь, *в* — февраль.



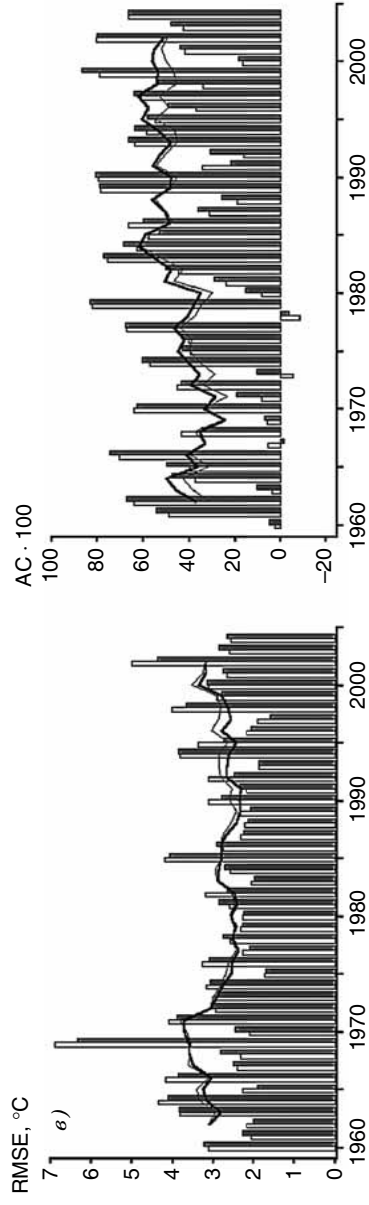


Рис. 7. Временной ход оценок прогнозов приземной температуры воздуха на территории России (RMSE слева и AC справа) для двух способов коррекции систематических ошибок.

1 — без учета САК, 2 — с учетом прогностических фаз САК, 3 и 4 — результат скользящего пятилетнего сглаживания данных 1 и 2 соответственно.

a — декабрь, б — январь, в — февраль.

## Заключение

Оценки воспроизводимости параметров САК, полученные по результатам многолетних серий исторических прогнозов на основе глобальных моделей общей циркуляции атмосферы T42L14 и T63L14 (ГГО), позволяют сделать следующие выводы.

Типичная пространственная структура САК на интервалах до сезона воспроизводится вполне удовлетворительно. Показателями этого являются, в частности, близость вкладов в суммарную дисперсию и геометрическое подобие полей 1-й э.о.ф. (образ САК), полученных при разложении фактических и прогностических полей SLP. Отметим несколько более высокие оценки подобия э.о.ф. и их вкладов, полученные по прогнозам с моделью более высокого пространственного разрешения T63L14.

На сезонном интервале отмечено удовлетворительное согласование оценок корреляции между давлением в азорском и исландском центрах действия атмосферы по прогностическим и фактическим данным.

Межгодовая изменчивость индекса САК и его составляющих в зимний сезон по результатам прогнозов на основе модели T42L14 оказывается существенно меньше, чем по фактическим данным (примерно в два раза по данным прогнозов на месяц и еще меньше в последующие месяцы). Одной из причин этого является фильтрация части изменчивости при осреднении результатов прогноза по ансамблю, другой причиной может быть недостаточное пространственное разрешение моделей.

Оценки качества прогнозов индекса САК показывают, что относительно успешными могут считаться прогнозы только на первый месяц в течение зимнего сезона ( $AC \approx 0,5...0,6$ ). Следует отметить, что эти оценки выше средних оценок, полученных в прогнозах приземной температуры воздуха по территории России. Прогнозы на последующие месяцы и сезон в целом нельзя признать удовлетворительными.

Показано, что прогнозы приземной температуры воздуха на территории России характеризуются различным смещением при разных фазах САК. При этом выявлено также наличие значимых корреляционных связей между ошибками прогнозов и прогно-

стическими значениями индекса САК, полученными в рамках того же прогноза.

Рассмотрен пример, иллюстрирующий перспективность использования связей между прогнозом САК и ошибками месячного прогноза на территории России для улучшения качества прогнозов.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-05-13572-офи\_ц).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Груза Г. В., Мещерская А. В. и др., 2008. Изменения климата России за период инструментальных наблюдений. — Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. — М., с. 31—87.

Мирвис В. М., Мелешко В. П., Гаврилина В. М., Матюгин В. А., Львова Т. Ю., 2006а. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. I. Категорические прогнозы — результаты 26-летних серий испытаний. — Метеорология и гидрология, № 1, с. 5—18.

Мирвис В. М., Мелешко В. П., Гаврилина В. М., Матюгин В. А., Львова Т. Ю., 2006б. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов. — Метеорология и гидрология, № 2, с. 5—16.

Пичугин Ю. А., Мелешко В. П., Матюгин В. А., Гаврилина В. М., 1998. Гидродинамические долгосрочные прогнозы погоды по ансамблю начальных состояний. — Метеорология и гидрология, № 2, с. 5—15.

Смирнов Н. П., Воробьев В. Н., Качанов С. Ю., 1998. Северо-Атлантическое колебание и климат. — СПб: изд. РГМУ. — 122 с.

Шнееров Б. Е., Мелешко В. П. и др., 2001. Современное состояние глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-2). — Труды ГГО, вып. 550, с. 3—43.

Barnston A. G., Livezey R. E., 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. — Mon. Wea. Rev., 115, p. 1083—1126.

Chen W. Y., Van den Dool H., 2003. Sensitivity of teleconnection patterns to the sign of their primary action center. — Mon. Wea. Rev., 131, p. 2885—2899.

Gibson, R., Källberg P., Uppala S., 1996. The ECMWF Re-Analysis (ERA) Project. — Newsletter, No. 73.

Hurrell J. W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation. — *Science*, 269, p. 676—679.

Jones P. D., Jónsson T., Wheeler D., 1997. Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. — *Int. J. Climatol.*, 17, p. 1433—1450.

Kalnay E. et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. — *BAMS*, 77, p. 437—470.

Kanamitsu M. et al., 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). — *BAMS*, 83, p. 1631—1643.

Osborn T. J., 2004. Simulating the winter North Atlantic oscillation: the roles of internal variability and greenhouse gas forcing. — *Clim. Dyn.*, 22, p. 605—623.

Molteni F., 2007. Teleconnections and interannual variability of the atmosphere. — ECMWF, Training Course — NWP-PR: [http://www.ecmwf.int/newsevents/training/meteorological\\_presentations/pdf/PR/Teleconnection.pdf](http://www.ecmwf.int/newsevents/training/meteorological_presentations/pdf/PR/Teleconnection.pdf).



УДК 551.58.001.57

**РАДИАЦИОННЫЙ И ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АТМОСФЕРЫ  
И КЛИМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА: ИНДЕКСЫ ВНЕШНЕГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ И ИХ ОЦЕНКА**

*И. Л. Кароль, В. А. Фролькис, 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 27.04.2009

**1. Введение**

Понятия радиационного форсинга (radiative forcing, *RF*) и потенциала глобального потепления (global warming potential, *GWP*), используемые в качестве численных показателей воздействия различных внешних факторов на радиационный режим атмосферы и климатическую систему, были предложены в конце 1990-х годов (IPCC, 1990, 1994), приблизительно в то же время, что и озоноразрушающий потенциал (ozone depletion potential, *ODP*) антропогенных химикатов (WMO-UNEP, 1991). С тех пор эти индексы широко используются не только в научных исследованиях, но и в прикладных целях для сопоставления влияния различных факторов на температуру и климат Земли. В частности, оценки *GWP* и *ODP* были официально включены в ряд основополагающих документов, таких как Монреальский протокол по ограничению производства и применения озоноразрушающих веществ и Киотский протокол, а *RF* использовался для сравнения вкладов воздействия на атмосферу полетов мировой транспортной авиации, выбросов продуктов крупных извержений вулканов, изменений солнечного спектра и др. (см. обзор в IPCC, 2007, главу 2).

Относительно недавно, наряду с вышеупомянутыми индексами, стали применять такой показатель, как потенциал глобальной температуры (global temperature potential, *GTP*), который характеризует эффект внешнего воздействия непосредственно на

температуру приземного воздуха, минуя радиационные показатели. Обсуждается также возможность введения некоторых промежуточных (между радиационными и термическими) показателей, например эффективности воздействия на климат  $E_s$  (Hansen et al., 2005).

Предлагаемый показатель  $GTP$  несомненно более прост и нагляден, а потому и удобен для неспециалистов, включая принимающих решение политиков, журналистов и др., по сравнению, например, с показателем  $GWP$ , при определении которого используются предварительно оцениваемые радиационные потоки, более трудные для понимания неспециалистами. В то же время строгое определение  $GTP$  и алгоритм его вычисления существенно сложнее и менее определены, чем определение  $GWP$ , как будет показано ниже.

Итак, существует целый ряд индексов, характеризующих отклик климатической системы Земли на различные внешние воздействия. Целью настоящей работы является обзор и сопоставление их преимуществ и недостатков, составление и обоснование рекомендаций для их использования в исследованиях и в оценках степени воздействий разнообразных антропогенных и естественных факторов на климат.

## 2. Радиационный форсинг и потенциал глобального потепления $GWP$

Радиационный форсинг ( $RF$ ) исследуемого компонента атмосферного воздуха в течение интервала времени  $t_1 < t < t_2$  — это разность суммарных эффективных потоков на некотором уровне в атмосфере (например, на уровне тропопаузы) в моменты времени  $t_2$  и  $t_1$ , вызванная изменением атмосферной концентрации этого компонента (IPCC, 1990).

Показатели  $RF$  и  $GWP$  были введены практически одновременно. В определении  $GWP$  используется величина  $RF$ :

$$GWP_A^X = \frac{\int_0^T RF_X(t) dt}{\int_0^T RF_A(t) dt} = AGWP^X / AGWP^A, \quad (1)$$

где  $X$  — исследуемый компонент воздуха,  $A$  — «эталонный» компонент воздуха,  $RF_X$  и  $RF_A$  — соответствующие им значения радиационного форсинга.

Поскольку  $RF_X$  и  $RF_A$  изменяются со временем, величина  $GWP$  зависит от рассматриваемого периода времени  $0 < t < T$ . Определение предполагает, что равные массы компонентов  $A$  и  $X$  порознь выбрасываются в глобальную или локальную атмосферу в начальный момент времени  $t = 0$  и затем эти массы последовательно сокращаются вследствие их удаления или разрушения в соответствии с их «временем жизни» в атмосфере  $\alpha_X$  и  $\alpha_A$ .

Абсолютный показатель  $GWP$  ( $AGWP$ ) используется самостоятельно для оценки эффекта изменения эмиссии или концентрации исследуемого радиационного компонента (см., например, Shine et al., 2005).

Интеграл от  $RF_X(t)$  за период  $t_1 < t < t_2$  или его среднее значение (radiative forcing commitment or contribution,  $RFC$ ) соответственно — последующие модификации  $RF$  (Кароль, 1996):

$$RFC_X = \int_{t_1}^{t_2} RF_X(t') dt'$$

или

$$\overline{RFC}_X = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} RF_X(t') dt'. \quad (2)$$

$RFC$  лишен некоторых недостатков, присущих  $RF$ . Один из таких недостатков заключается в том, что  $RF$  оказывается отрицательным в случае, если содержание исследуемого компонента воздуха убывает со временем. Подобная ситуация имеет место в последние годы с хлорфторуглеводородами (ХФУ), оказавшимися под юрисдикцией Монреальского протокола (IPCC, 2007, глава 2; WMO/UNEP, 2007, глава 8). Такие же проблемы возникают при оценке радиационных и климатических эффектов от извержения крупных вулканов, подобных извержению Пинатубо (Robock, 2000). Радиационные эффекты таких короткопериодных внешних воздействий оцениваются некоторыми авторами по

максимальному отклонению радиационного эффективного потока от его фонового уровня, зарегистрированного до исследуемого события (Stenchikov et al., 1998; Oman et al., 2005).

Предлагаемый Д. Хофманном и др. (Hofmann et al., 2007) годовой индекс парниковых газов (annual greenhouse gas index, *AGGI*) очень близок по подходу к вышеупомянутым индексам. Согласно определению, *AGGI* — среднегодовое изменение *RF*, обусловленное наблюдаемым увеличением содержания парникового газа в рассматриваемый период. Авторы предлагают отнести такое изменение *RF* к его величине в 1990 г. в соответствии с рамками Киотского протокола. Тогда значения *AGGI* для 2004 и 2005 гг. оказываются равными 1,200 и 1,214 соответственно (Hofmann et al., 2007). В некоторых случаях, например при значительных сезонных изменениях содержания в атмосфере исследуемого химиката, при вычислении *AGGI* целесообразна замена *RF* на *RFC*.

Классическая интерпретация *RF* нуждается также в корректировке при рассмотрении эффекта, производимого фотохимически активными парниковыми газами, такими как метан  $\text{CH}_4$ , закись азота  $\text{N}_2\text{O}$  и ХФУ. Каждый из них играет важную роль в формировании озонового слоя и/или является парниковым газом. Кроме того, вследствие их активного взаимодействия в процессе фотохимических преобразований в атмосфере поведение каждого такого газа существенно зависит от поведения остальных газов. Это обстоятельство сильно затрудняет выделение радиационного эффекта, обусловленного эволюцией одного отдельно взятого газа (особенно, когда концентрации некоторых газов, в частности ХФУ, убывают в результате действия ограничительных мер Монреальского протокола).

Для подобных ситуаций в работах Фролькиса с соавторами (1999, 2002) было предложено усовершенствовать процедуру нахождения *RF* посредством «фильтрации» эффектов, вызываемых всеми газами, кроме исследуемого. Классическая «кумулятивная» схема предусматривает следующую формулу вычисления *RF<sup>c</sup>*:

$$RF^c = \Delta F^c = F_X(t) - F(t_0), \quad t > t_0. \quad (3)$$

Здесь  $t_0$  и  $t$  — начальный и конечный моменты времени, а  $F$  — суммарный эффективный поток радиации на верхней границе атмосферы (или на тропопаузе). Схема предполагает сохранение неизменными источников всех радиационно активных газов и их концентраций за исключением исследуемого газа  $X$  в течение всего рассматриваемого периода.

В «индивидуальной» схеме (Фролькис и др., 1999; Frolkis et al., 2002) используется несколько иная формула вычисления  $RF$ :

$$RF^I = \Delta F^I = F_X(t) - F^0(t), \quad t > t_0, \quad (4)$$

где  $F_X(t)$  — то же, что и в формуле (3), в то время как  $F^0$  вычисляется в конечный момент времени  $t$  при условии «замороженного» в  $t > t_0$  источника газа  $X$ . Такой подход обеспечивает исключение воздействия изменений концентраций прочих газов и позволяет выделить индивидуальный эффект газа  $X$ . Последнее важно и необходимо, например, при значительном убывании содержания в атмосфере газов, тесно связанных с газом  $X$ , подобных ХФУ и  $\text{NO}_x$ , в результате чего  $RF$  оказывается отрицательным. (Пояснение этих схем на простой модели см. в приложении.)

На рис. 1 и 2 представлены оценки  $GWC$  и  $RRF$  (т. е. значение  $RF$  парниковых газов, отнесенное к значению  $RF \text{CO}_2$ ) для периодов 1995—2020 и 1995—2050 гг. (Frolkis et al., 2002). Оценки были осуществлены с помощью одномерной глобальной радиационно-фотохимической модели атмосферы. Использовались два сценария ИРСС выбросов парниковых газов: А2 и В1. До тех пор пока содержание основных парниковых газов в атмосфере возрастает, индексы положительны для обоих сценариев и периодов, однако для ХФУ (F-11, F-12) и стратосферного водяного пара они отрицательны по сценарию В1, где сказывается эффект сокращения концентрации ХФУ.

«Индивидуальная» схема также удобна для оценки влияния наблюдаемого в последние десятилетия сокращения содержания стратосферного озона (в частности, антарктической «озонной дыры») на радиационные потоки.

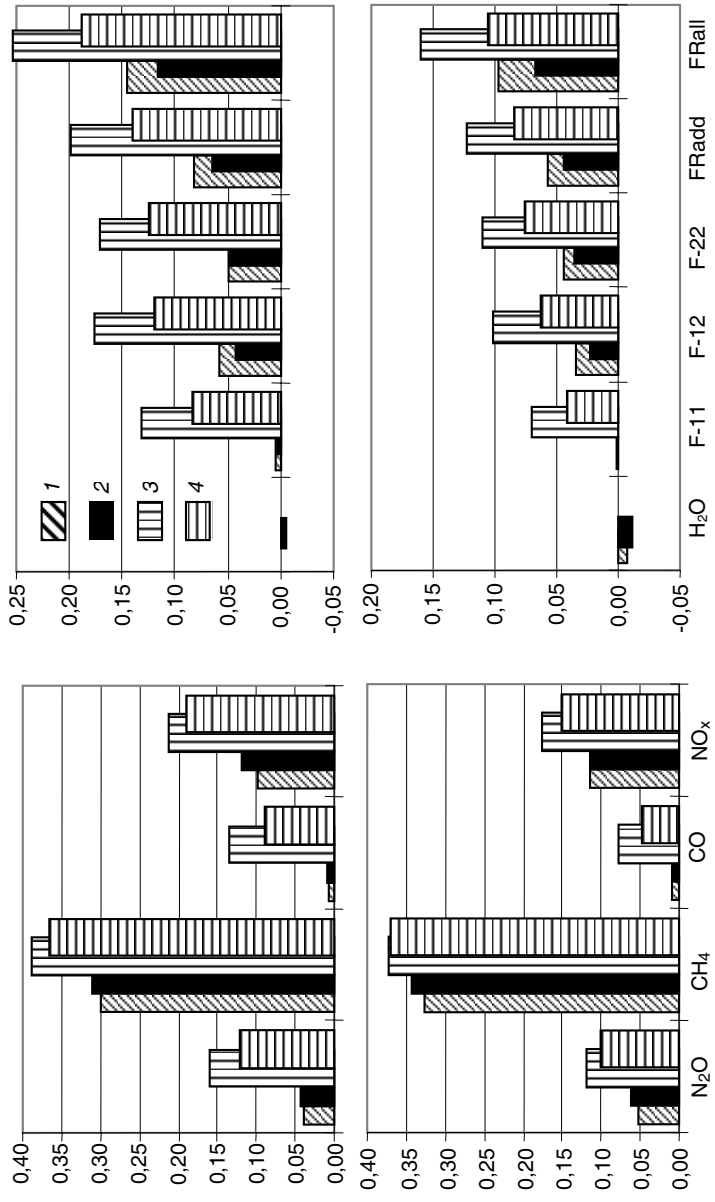


Рис. 1. Приспособленные *RRF* и *GWS*, вычисленные по сценарию A2 IPCC для эмиссий указанных газов для периодов 1995—2020 гг. (вверху) и 1995—2050 гг. (внизу).

FRaI — совокупная эмиссия всех ХФУ; FRadd есть FRaI минус сумма F-11, F-12, F-22.  
 1 — *GWCS*, «индивидуальная» схема; 2 — *RRF*, «индивидуальная» схема; 3 — *GWCS*, «кумулятивная» схема;  
 4 — *RRF*, «кумулятивная» схема (Folkis et al., 2002).

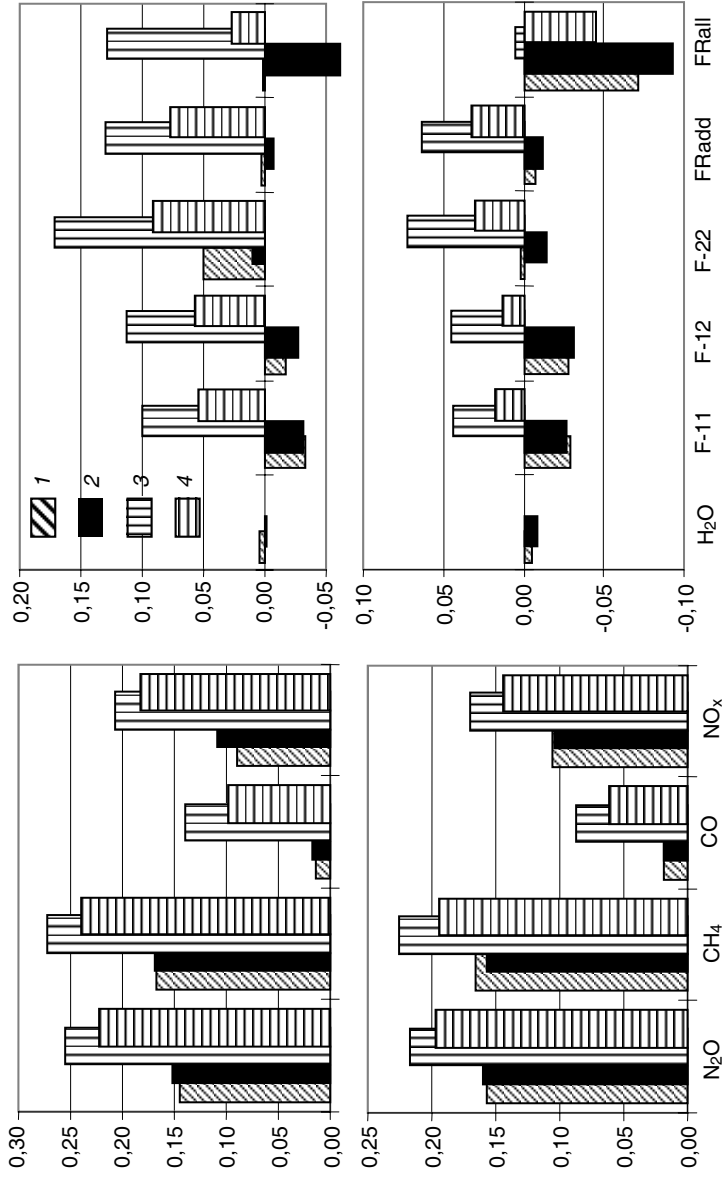


Рис. 2. Приспособленные *RRF* и *GWP*, вычисленные по сценарию *V1* ИРСС для эмиссий указанных газов для периодов 1995—2020 гг. (вверху) и 1995—2050 гг. (внизу).  
Усл. обозначения см. рис. 1.

### 3. Потенциал глобальной температуры *GTP*

Новый температурный индекс *потенциал глобальной температуры (GTP)* предложен в работах Shine et al. (2005) и IPCC (2007). *GTP* парникового газа или какого-либо другого климатоформирующего фактора  $X$  относительно «эталонного» фактора  $A$  определяется по формуле

$$GTP_A^X = \Delta T_X^H / \Delta T_A^H, \quad (5)$$

где  $\Delta T_X^H$  и  $\Delta T_A^H$  — изменения приземной температуры воздуха, обусловленные факторами  $X$  и  $A$  соответственно, в течение периода  $0 < t < H$ . Этот индекс более нагляден и удобен для неспециалистов, поскольку отражает непосредственно такой привычный всем параметр, как температура, а не менее понятные радиационные свойства атмосферы.

Процедура вычисления *GTP*, представленная в работе Shine et al. (2005), основана на уравнении баланса энергии:

$$C \frac{d\Delta T(t)}{dt} = \Delta F(t) - \Delta T(t) / \lambda, \quad (6)$$

где  $\Delta F$  — внешний форсинг,  $C$  и  $\lambda$  — теплоемкость и термическая чувствительность климатической системы соответственно.

Если  $C$  и  $\lambda$  постоянны и  $\Delta F = A \exp(-t/\alpha)$ , то простым вычислением получаем *абсолютный потенциал глобальной температуры (AGTP)* в конце периода  $0 < t < H$ :

$$AGTP_X(H) = A[\exp(-H/\alpha) - \exp(-H/\tau)] / [C(\tau^{-1} - \alpha^{-1})], \quad (7)$$

где  $\tau = \lambda C$  — «время жизни» (релаксации) климатической системы,  $\alpha$  — «время жизни» внешнего воздействия ( $\tau \neq \alpha$ ).

Простая формула получена для непрерывного форсинга  $\Delta F(t)$  и произвольного радиационно активного газа или аэрозоля (Shine et al., 2005), в частности  $\text{CO}_2$ . Некоторые примеры и сравнения *GWP* и *GTP* представлены ниже. Анализ *GTP* показал, например, что импульсы короткоживущих газов не оказывают заметного



эффекта на  $\Delta T$  при расчетном периоде 100 лет. В расчетах *GWP* такой картины не наблюдается.

Однако если вычисление *RF* и других радиационных индексов требует лишь моделирования атмосферных радиационных потоков, то для оценки температурного режима необходима более комплексная информация, например характер взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью, определяющего в значительной степени чувствительность климатической системы к исследуемому климатоформирующему фактору. Несомненно, это создает серьезные трудности для аккуратного нахождения *GTP*.

Параметр  $\tau$  изменяется в широких пределах в зависимости от выбранного элемента климатической системы — от пары месяцев для стратосферы до нескольких тысячелетий для всей системы в целом (включая глобальный океан и континентальный ледяной покров). Например, в работе Шайна и др. (Shine et al., 2005) при анализе тепловой диффузии эффективные значения  $\tau$  заметно возрастали от поверхности океана в глубину. Вариации  $\tau$  также могут быть обусловлены и региональными различиями.

Чувствительность климатической системы Земли существенно зависима от продолжительности внешнего воздействия и типа отклика. Короткий (20 лет), средний (100 лет) и длительный (500 лет) периоды, используемые при вычислении *GWP* в работе IPCC (1990), можно ассоциировать с различными частями климатической системы:

- атмосфера и верхний слой океана толщиной 0,05—0,10 км;
- атмосфера и верхний слой океана толщиной 0,5—1,0 км (термоклинный слой);
- атмосфера и весь океан.

Работой С. Шварца (Schwartz, 2007) была инициирована широкая дискуссия о чувствительности климата, в которой приняли участие многие ученые (см. Knutti et al., 2008; Foster et al., 2008; Scafetta, 2008). Эта дискуссия базировалась главным образом на статистическом анализе временных рядов наблюдаемой среднегодовой глобальной температуры приземного воздуха и интерпретации ее статистических характеристик, полученных после вычитания трендов.

Первоначальные оценки Шварца по чувствительности равновесного климата ( $\lambda$ ) и повышению температуры  $T_2$ , обусловленному удвоением концентрации  $\text{CO}_2$ , составляли:  $\lambda = 0,30 \pm 0,14$  К/(Вт · м<sup>-2</sup>) и  $T_2 = 1,1 \pm 0,5$  К. Дискуссия повлекла внесение значительной коррекции в эти оценки:  $\lambda = 0,51 \pm 0,26$  К/(Вт · м<sup>-2</sup>) и  $T_2 = 1,9 \pm 1,0$  К при  $\tau = 8,5 \pm 2,5$  лет в качестве постоянной времени климатической системы (Schwartz, 2008). Эта оценка для  $T_2$  не слишком отличается от оценки  $T_2 = 3,0$  (+1,5/-1), приведенной в работе ИРСС (2007). Она была получена с достоверностью 66 % обработкой многочисленных модельных результатов, а также небольшого числа эмпирических оценок  $T_2$ . Шварц подчеркивает, что модельные оценки  $T_2$  очень чувствительны к вариациям модельных параметров (Schwartz, 2008).

На базе статистического анализа глобальных температурных рядов с удаленным трендом за период 1880—2007 гг. Н. Скафетта (Scafetta, 2008) обнаружил хорошее согласие между эмпирической автокорреляционной функцией и суммой двух экспонент с характеристическими временами  $\tau_1 = 0,4 \pm 0,1$  лет (5 мес) и  $\tau_2 = 8,7 \pm 2,0$  лет. Последнее значение близко к выше упоминавшемуся  $\tau = 8,5 \pm 2,5$  лет. Автор указывает при этом, что ограниченность длины временного ряда глобальной температуры (128 лет) не позволяет исследовать роль больших значений  $\tau$ .

Приведенные результаты показывают, что для климатической системы некоторые временные константы могут сосуществовать. Так, в климатической системе Земли есть компоненты с большой инерцией — океан и обширные ледниковые щиты. Некоторые временные константы, характеризующие долгопериодные процессы, невозможно оценить посредством анализа существующих коротких временных рядов температуры подстилающей поверхности, и потому необходимо привлечение в анализ данных палеорекострукций. Расширение существующих периодов может значительно изменить как значения  $GWP$  и  $GTP$ , так и наши представления о чувствительности климатической системы. Конечно, решение этой проблемы — дело не ближайшего будущего, но возможность наличия различных значений чувствительности климатической системы Земли  $\lambda = C/\tau$  для периодов 20, 100 и 500 лет следует учитывать.

Проиллюстрируем сказанное вычислением  $AGTP_X(H)$  для трех периодов:  $H_1 = 20$  лет,  $H_2 = 100$  лет и  $H_3 = 500$  лет. Формула (7) для  $AGTP_X(H)$  может быть преобразована к виду

$$AGTP_X(H_i) = \frac{A_X B_i \tau_i}{C_i (1 - \tau_i / \alpha_X)} \left[ \exp \frac{H_i}{\tau_i} \left(1 - \frac{\tau_i}{\alpha_X}\right) - 1 \right], \quad i = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где  $\tau_i = \lambda C_i$  и  $B_i = \exp(-H_i / \tau_i)$ .

Следуя работе Shine et al. (2005), мы предполагаем, что  $\lambda = 0,8$  К/(Вт · м<sup>-2</sup>), теплоемкость 100-метрового слоя океана  $C_1 = 13,3$  Вт/(м<sup>2</sup> · К), и  $\tau_1 = 10,65$  лет — временная константа для системы «атмосфера + верхний квазиоднородный слой океана». Значение  $\tau_1$  близко к вышеупомянутой оценке из работы Scafetta (2008) для периода, составляющего несколько десятилетий.

Для охвата периодов  $H_2, H_3$  термоклинный слой океана толщиной 500 м и весь океан должны иметь теплоемкости  $C_2 = 5C_1$ ,  $C_3 = 8C_2$  соответственно. Перенос тепла к слою  $C_2$  параметризован 25 %-ным уменьшением параметра  $\lambda$  в уравнении (6) (Кароль, 1986), что приводит к значениям  $\tau_2 = \lambda_2 C_2 = 0,6 \times 5 \times 13,3 = 40$  лет;  $H_2 / \tau_2 = 2,5$ ;  $B_2 = 0,082$ . Перенос тепла к слою  $C_3$  параметризован согласно оценкам модели диффузии и подъема глубинных вод океана на поверхность (upwelling — diffusion oceanic model) (IPCC, 1990). Скорость этого переноса тепла может быть оценена как 75 % скорости повышения температуры в слое  $C_1$  для параметров уравнения (6). Тогда имеет место коррекция для слоя  $C_3$ :  $C'_3 = 740$  Вт/(м<sup>2</sup> · К) и  $\tau_3 = \lambda_1 C_3 = 590$  лет;  $H_3 / \tau_3 = 0,85$  и  $B_3 = 0,428$ .

Мы имеем две асимптотические формулы для вычисления  $AGTP_X(H_i)$ :

а) для «долгоживущего» радиационного фактора с  $\alpha_X \gg \tau_i = \lambda_i C_i$

$$AGTP_X(H_i) \approx A_X \lambda_i (1 - B_i) \quad (9)$$

(следовательно, абсолютный асимптотический  $GTP$  не зависит от  $\alpha_X$  — времени действия фактора);

б) для «короткоживущего» фактора с  $\alpha_X \ll \tau_i$  и  $\alpha_X \ll H_i$

$$AGTP_X(H_i) \approx A_X \lambda_i B_i \alpha_X \tau_i^{-1} [1 - \exp(-H_i/\alpha_X)] \approx A_X \lambda_i B_i \alpha_X / \tau_i. \quad (10)$$

Асимптотические формулы (9) и (10) поясняют свойства  $AGTP_X(H_i)$  и  $GTP_A^X(H_i)$ , полученных в работе Шайна и др. (Shine et al., 2005) прямыми вычислениями.

В таблице приложения представлены значения  $AGTP_X(H_i)$  и  $GTP_{CO_2}^X(H_i)$ , вычисленные с использованием данных из работы К. Шайна и др. (Shine et al., 2005). Некоторые результаты из этой работы включены в нижеприведенную таблицу для сравнения.

Наилучшее согласие имеет место для  $AGTP$  и  $GTP$  в случае  $H = H_1$ , когда в расчетах использованы практически одни и те же начальные данные. Однако для двух других периодов ( $H = H_2$  и  $H = H_3$ ) результаты заметно различаются, что формально обусловлено различием в константах  $\tau_i = \lambda_i C_i$ . Результаты, вычисленные по асимптотическим формулам (9) и (10), близки к полученным по формуле (8).

Сравнение и анализ полученных значений  $AGTP$  показывают, что большие значения для периодов  $H_2$  и, особенно,  $H_3$  связаны с продолжительной передачей энергии из атмосферы в океан и с его большей теплоемкостью. Общее увеличение индексов  $AGTP$  и  $GTP$  можно интерпретировать как некоторое увеличение «времени жизни»  $\alpha$  радиационного фактора в атмосфере. Так, отношения этих индексов для периодов  $H_2/H_1$  и  $H_3/H_1$  почти одинаковы у  $CO_2$ , метана и у короткоживущего ХФУ-152а. Увеличение эффективной продолжительности внешнего воздействия на климатическую систему отражает учет в модели различия для разных периодов  $H_i$  скорости обмена энергией атмосферы с океаном и теплоемкости частей океана в оценках.

#### 4. Заключение

Приведенный выше краткий обзор показывает, что корректно оценить внешнее воздействие на климатическую систему не так просто, как может показаться на первый взгляд. Существуют оп-

ределенные проблемы с оптимальным выбором как критериев (индексов) такой оценки, так и алгоритма их вычисления. Каждый из вышеприведенных индексов может оказаться наиболее удобным для конкретного исследования, однако не является безусловно предпочтительным для всех исследовательских направлений. Для вычисления некоторых индексов, таких как  $GTP$  и эффективность воздействия на климат  $E_S$ , требуется значительный объем дополнительной информации, не всегда доступной.

Для вычисления радиационных индексов ( $RF$ ,  $GWP$  и др.) нужно относительно немного информации. Они удобны для обобщенных сравнений эффектов от различных явлений, влияющих на радиационный баланс климатической системы.

Некоторые усовершенствования могут быть предложены в отношении  $RF$ :

использование  $RF_C$  при оценках кратковременных воздействий, применение «индивидуальной» и «кумулятивной» схем вычисления  $RF$  (в оценках роли отдельных элементов — газов, аэрозолей — фотохимической системы).

Температурные индексы, такие как  $GTP$  и  $E_S$ , теоретически более удобны для прикладного количественного анализа отклика климатической системы в глобальном и региональном масштабах. Однако, как правило, их вычисление производится с помощью климатических моделей, и поэтому полученные оценки сильно зависят от особенностей построения таких моделей (например, неопределенностей во внешних модельных параметрах). Как следствие, корректное сравнение полученных разными авторами результатов и выработка на их базе общих практических рекомендаций оказываются весьма проблематичными.

Проблема оценки воздействия различных факторов на климатическую систему Земли и выбора наиболее подходящих для этой цели индексов нуждается в дальнейшем всестороннем изучении. На сегодняшний день наиболее применимыми остаются  $RF$  и  $GWP$ .

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-05-64496а и 08-05-00778а) и частично Швейцарского научного фонда SNSF (проект IB7320-110884).*

**Пояснение к вычислению радиационного форсинга  $RF$   
по «кумулятивной» и «индивидуальной» схемам**

В модели двух парниковых газов (содержание  $q_1$  и  $q_2$  соответственно) справедливы уравнения сохранения массы:

$$\begin{aligned} dq_1/dt + \lambda_1 q_1 &= Q_1 \exp(a_1 t), \\ dq_2/dt + \lambda_2 q_2 &= Q_2 \exp(a_2 t) + \underline{kq_1 q_2} \end{aligned} \quad (\text{П.1})$$

с начальными условиями  $q_i |_{t=0} = q_i^{(0)}$  ( $i = 1, 2$ ). Здесь подчеркнутый член отражает фотохимический источник (сток)  $q_2$ , все коэффициенты постоянны,  $t$  — время.

Поток радиации  $F(t)$  и радиационный форсинг  $RF$  газа  $q_1$  за период  $(0, t)$  могут быть промоделированы следующим образом:

$$RF = F(t) - F(0); F(t) = A_1 q_1(t) + A_2 q_2(t) \quad (A_i = \text{const}). \quad (\text{П.2})$$

Тогда «кумулятивный»  $RF^c$  для газа  $q_2$  в системе (П.1) будет описываться формулой

$$RF^c = F^c(t) - F^c(0) = \Sigma A_i [q_i^*(t) - q_i(0)], \quad i = 1, 2, \quad (\text{П.3})$$

где  $q_i^*(t) = q_i(t)$  для  $a_i = 0$ .

Выражение для  $RF^I$  в случае «индивидуальной» схемы будет иметь вид

$$RF^I = A_2 [q_2^*(t) - q_2^{**}(t)], \quad (\text{П.4})$$

где  $q_2^{**}(t) = q_2^*(t)$  при  $a_2 = 0$ .

При этом присутствие газа  $q_1$  является неявным.

Полагая  $\lambda_i$  и  $Q_i > 0$ ,  $a_i$  ( $i = 1, 2$ ),  $k = \text{const}$ , легко найти:

$$RF^c \approx A_1 Q_1 \lambda_1^{-1} + A_2 Q_2 \exp(a_2 t) (a_2 + b)^{-1}; \quad b = \lambda_2 - k Q_1 \lambda_1^{-1} > 0, \quad (\text{П.5})$$

$$RF^I \approx A_2 Q_2 [\exp(a_2 t) / (a_2 + b) - b^{-1}] \quad (\text{П.6})$$

для больших  $t \rightarrow \infty$ .

Рассматриваются следующие случаи:

Случай А.  $a_2 > 0$  — интенсивность источника  $q_2$  возрастает:

$RF^c > 0$  всегда и возрастает со временем,  $RF^I > 0$  для больших  $t$ , но  $RF^I < 0$  при  $t < a_2^{-1} \ln(1 + a_2/b)$ ;  $b > 0$  для  $k < 0$  — фотохимический сток; для  $k > 0$  — фотохимический источник  $b > 0$  при  $\lambda_2/\lambda_1 > kQ_1$ .

Случай В.  $a_2 < 0$  — интенсивность источника  $q_2$  уменьшается:  $RF^c > 0$ ;  $RF^I < 0$  всегда и при  $t \rightarrow \infty$   $RF_\infty^c = A_1 Q_1 \lambda_1^{-1}$  определяется компонентом  $q_1(t)$ :  $RF_\infty^I = -A_2 Q_2 b^{-1} = -A_2 Q_2 \lambda_1 (\lambda_1 \lambda_2 - k Q_1)^{-1} < 0$  при  $k < 0$  или  $0 < k < \lambda_1 \lambda_2 / Q_1$ , что необходимо для устойчивости системы (см. уравнения (П.1)).

Таким образом, в  $RC_\infty^I$  параметры  $q_1(t)$  входят лишь через величину  $b$ .

Таблица П.1  
**Абсолютный и относительный глобальные температурные потенциалы (AGTP и GTP),**  
**вычисленные по формулам (8)–(10)**

|   | Газ                    |                        |                       |                        |                        |       |       |
|---|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------|-------|
|   | CO <sub>2</sub>        | HFC-152a               | CH <sub>4</sub>       | N <sub>2</sub> O       | CF <sub>4</sub>        |       |       |
| $\alpha$ (число лет)*                           | ~100                   | 1,4                    | 12                    | 114                    | $5,0 \times 10^5$      |       |       |
| $A_X \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг})^*$ | $1,98 \times 10^{-15}$ | $7,66 \times 10^{-12}$ | $1,3 \times 10^{-13}$ | $3,96 \times 10^{-13}$ | $5,11 \times 10^{-12}$ |       |       |
| $A_X / A_{\text{CO}_2}^*$                       | 1,0                    | 3870                   | 65,66                 | 200,1                  | 2580                   |       |       |
| $GTP_{\text{CO}_2}^{X*}$                        | 1                      | 170                    | 0,35                  | 290                    | 4150                   | 7490  | 11700 |
| $AGTP_X / A_X \lambda \cdot 10$                 | 7,45                   | 0,231                  | 0,030                 | 0,0102                 | 3,21                   | 0,351 | 0,089 |
| $AGTP_X / A_X \lambda \cdot 10^{**}$            | 8,47                   | 0,20                   | 0,027                 | 0,0102                 | —                      | 0,24  | 0,087 |
| $GTP_{\text{CO}_2}^X$                           | 1                      | 120                    | 24,4                  | 45,8                   | 28,3                   | 4,83  | 5,38  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 215   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 203   | 232   |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 2930  | 4980  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 4150  | 7490  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 9,18  |
|   |                        |                        |                       |                        |                        | 8,47  | 7,71  |
|   |                        |                        |                       |                        | </                     |       |       |



#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кароль И. Л., 1986. О возможных антропогенных изменениях газового состава и температуры до 2000 года. — *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 115—123.
- Кароль И. Л., 1996. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата. — *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 5—12.
- Фролькис В. А., Кароль И. Л., Киселев А. А., 1999. Диагностика антропогенных изменений климата моделированием радиационно-фотохимических процессов в атмосфере. — *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*, т. 35, № 4, с. 444—456.
- Foster G., Annan J. D., Schmidt G. A., Mann M. E., 2008. Comment on “Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth’s climate system” by S. E. Schwartz. — *J. Geophys. Res.*, 113, D15102, doi:10.1029/2007JD009373.
- Frolkis V. A., Karol I. L., Kiselev A. A., 2002. Global warming potential, global warming commitment and other indexes as characteristics of the effects of greenhouse gases on Earth’s climate. — *Ecological Indicators*, V. 2, is. 1—2, p. 109—121.
- Hansen J., Sato M., Ruedy R. et al., 2005. Efficacy of climate forcing. — *J. Geophys. Res.*, V. 110, (D18), D18104, doi:10.1029/2005JD005776.
- Hofmann D. J. et al., 2007. Tracking climate forcing: the annual greenhouse gas index. — *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, V. 88, p. 509—511.
- IPCC, 1990. *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment* / J.T. Houghton et al., eds. — Cambridge University Press, Cambridge (Ch. 2, 6).
- IPCC, 1994. *Climate Change. Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios* / J. T. Houghton et al., eds. — Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon et al., eds. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (Ch. 2).
- Knutti R., Krähenmann S., Frame D. J., Allen M. R., 2008. Comment on “Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth’s climate system” by S. E. Schwartz. — *J. Geophys. Res.*, 113, D15103, doi:10.1029/2007JD009473.
- Oman L., Robock A., Stenchikov G., Schmidt G. A., Ruedy R., 2005. Climatic response to high-latitude volcanic eruptions. — *J. Geophys. Res.*, 110, D13103, doi:10.1029/2004JD005487.
- Robock A., 2000. Volcanic eruptions and climate. — *Rev. Geoph.*, V. 38, p. 191—219.
- Scafetta N., 2008. Comment on “Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth’s climate system” by S. E. Schwartz. — *J. Geophys. Res.*, 113, D15104, doi:10.1029/2007JD009586.
- Schwartz S. E., 2007. Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth’s climate system. — *J. Geophys. Res.*, 112, D24S05, doi:10.1029/2007JD008746.

Schwartz S. E., 2008. Reply to comments by G. Foster et al., R. Knutti et al., and N. Scafetta on “Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth’s climate system”. — *J. Geophys. Res.*, 113, D15105, doi:10.1029/2008JD009872.

Shine K. P., Fuglestedt J. S. et al., 2005. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emission of greenhouse gases. — *Climate change*, V. 68, p. 281—302.

Stenchikov G. L. et al., 1998. Radiative forcing from the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption. — *J. Geophys. Res.*, 103 (D12), p. 13837—13857.

WMO—UNEP, 1991. Scientific assessment of ozone depletion: 1991. — WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. No. 25. — Geneva, Switzerland (Ch. 6, 7).

WMO—UNEP, 2007. Scientific assessment of ozone depletion: 2006. — WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. No. 50, 572 p. — Geneva, Switzerland (Ch. 8).

УДК 551.58

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
РАБОТ В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНОЙ КЛИМАТОЛОГИИ**

*Н. В. Кобышева*

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

Поступила в редакцию 27.08.2009

**Введение**

Прикладная климатология становится в настоящее время одним из основных разделов климатологии. Опираясь на фундаментальную климатологию, прикладная климатология изучает закономерности как прямого влияния погодно-климатических факторов на экологическую, социальную и экономическую сферы, так и обратного воздействия человеческой деятельности на климат на локальном, региональном, страноведческом и глобальном уровнях. Прикладная климатология непосредственно связана с экономикой, ее продукция оказывает заметное влияние на развитие экономики страны.

Прикладную климатологию можно считать многодисциплинарной наукой. Научно-технический прогресс стимулировал развитие специализированных ветвей прикладной климатологии, таких как строительная, сельскохозяйственная, энергетическая, транспортная, медицинская и др. Подобная дифференциация прикладной климатологии предполагает тесные связи климатических условий с объектами областей потребления.

Еще в 1952 г. О. А. Дроздов писал, что практические рекомендации по использованию климатической информации должны основываться «как на знании самого климата в целом во всем многообразии его связей, теоретических основ его возникновения и изменения, так и той области, для которой даются рекомендации» (Дроздов, 1952).

Ключевыми задачами прикладной климатологии являются разработка, совершенствование и использование систем специализированных климатических показателей (СКП). Для их формирования и дальнейшего использования должны быть сформулированы требования к системам получения метеорологической информации, методологии ее обобщения и моделирования будущего климата.

Для начала определимся с понятием «специализированный климатический показатель». Специализированными называются объектно-ориентированные климатические показатели, характеризующие влияние климата на конкретные объекты и производственные процессы в различных секторах экономики. СКП, численно выраженный в градусах, миллиметрах и других единицах, не является конечным продуктом, непосредственно включаемым в технологическую цепочку процесса потребления.

Обычно СКП преобразуется в некоторый технический параметр, который и входит в проектные расчеты, участвует в принятии хозяйственных или управленческих решений и разработке стратегий развития основных секторов экономики с учетом меняющегося климата. Так, давление ветра превращается в ветровую нагрузку, высота снежного покрова и количество твердых осадков — в массу снега и снеговую нагрузку на здания и сооружения, температура наиболее холодных суток и пятидневок — в теплопотери зданий и т. п.

Следует заметить, что иногда один и тот же специализированный климатический параметр используется для разных целей и в некоторых случаях не по назначению. Например, по температуре наиболее холодной пятидневки оценивают марку стали. Это неправильно, так как охлаждение стали — процесс малоинерционный. Температура же наиболее холодной пятидневки заданной обеспеченности установлена опытным путем в качестве специализированного показателя для оценки теплозащиты здания при толщине его стены в 2,5 кирпича, т. е. для процесса достаточно инерционного. Известно, что за 5 суток при отсутствии отопления температура внутри здания в этих условиях становится такой же, как снаружи.

Во избежание подобных ошибок, для достижения точного соответствия СКП решаемой задаче специализированная климати-

ческая информация должна разрабатываться в условиях тесного сотрудничества климатологов с пользователями информации. Это позволит однозначно и аргументировано устанавливать СКП, связанные с техническими параметрами, а также назначать для экстремальных климатических характеристик обоснованные уровни вероятности.

Только в процессе такого сотрудничества оказывается возможным выявление специфических особенностей процесса климатического воздействия на тот или иной объект и принятие оптимальных решений, и в том числе соответствующих адаптационных мер. Наоборот, формальная ориентация на традиционные климатические показатели, которые часто запрашивают недостаточно компетентные потребители или предоставляют неопытные климатологи, может привести к ошибочным решениям, поскольку эти показатели не учитывают специфику отрасли.

К настоящему моменту существует несколько систем достаточно хорошо обоснованных СКП. В первом приближении эти системы можно представить в виде деревьев. На стволах деревьев и основных ветвях изображена инфраструктура конкретного сектора экономики, а на остальных ветвях — основные СКХ, обеспечивающие каждый элемент инфраструктуры.

На рис. 1 представлен пример такого дерева для энергетики.

### **1. Нормативная климатическая информация**

Часть специализированной климатологической информации, направленная на решение конкретных, наиболее важных технических задач, стандартизирована и содержится в следующих нормативных документах:

- строительных нормах и правилах (СНиП),
- территориальных строительных нормах (ТСН),
- правилах установки электрооборудования (ПУЭ),
- правилах и нормах по ядерной и радиационной (атомной энергетике) безопасности (ПНАЭ),
- государственных стандартах районирования для технических целей (ГОСТ).

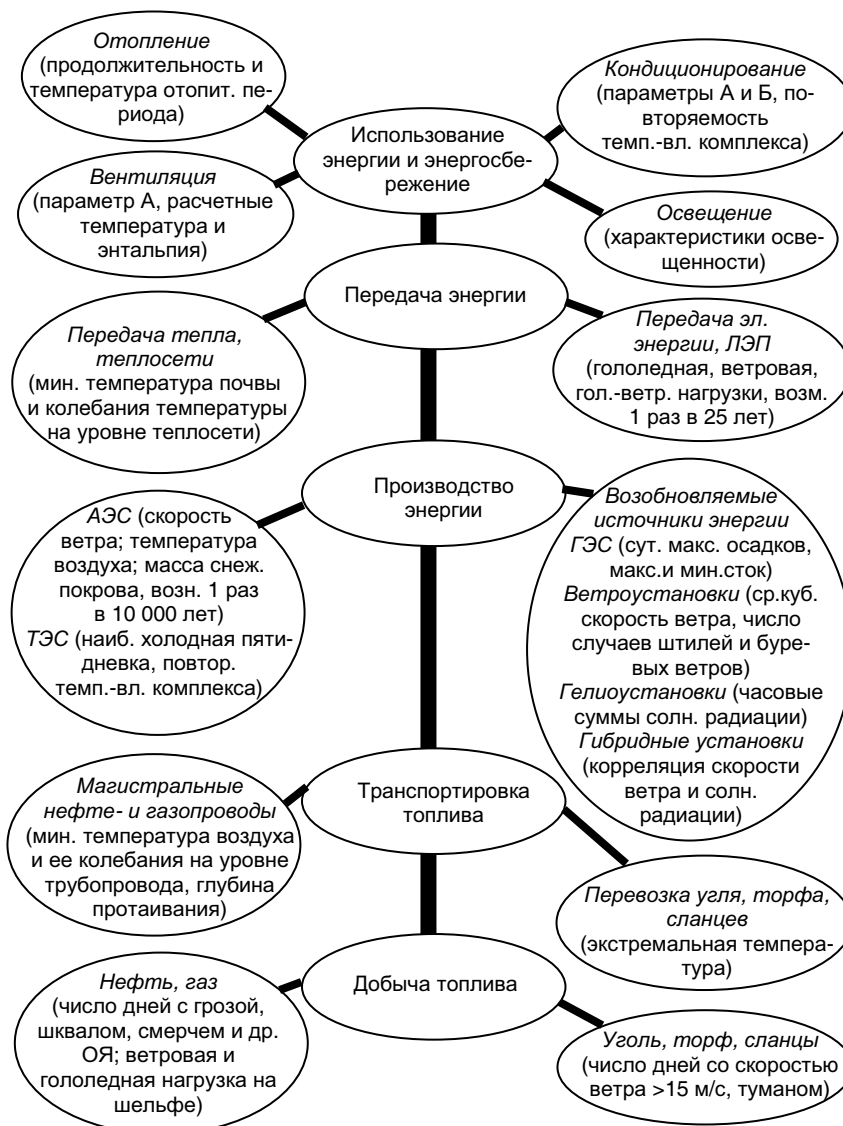


Рис. 1 . Дерево энергоклиматических ресурсов.

Нормативные документы регулярно пересматриваются и корректируются, причем их уточнение в связи с наблюдающимися изменениями климата особенно важно.

СНиПы в значительной мере обеспечивают безопасность функционирования строительных объектов. Однако при изменении климата в последнее время часто возникают «занормативные» нагрузки на изношенные сооружения, что следует учитывать.

В последнем издании главы СНиП по атмосферным нагрузкам (СТО 36554501-015-2008) нагрузочные показатели приближены специалистами ГГО к решаемым в современном строительстве задачам. В частности, карты ветрового давления построены для открытой местности (по специально для этого разработанной методике приведения ветра на защищенных от ветра метеостанциях к открытому местоположению). Снеговые нагрузки, наоборот, приведены путем введения специальных поправок (совместная разработка Центрального НИИ строительных конструкций и ГГО) к закрытому местоположению, каковым можно считать крыши зданий. Дополнительно разработан ряд территориальных строительных норм для нескольких административных районов (Башкортостан, Ленинградская, Самарская, Пермская области).

При переработке ПУЭ-7, которая запланирована на ближайший год, строятся новые карты гололедных и ветровых нагрузок, а также ветра при гололеде, возможных один раз в 25 лет, и продолжительности гроз по продленным метеорологическим рядам и тоже с учетом изменения климата. Эти карты не будут иметь пробелов (заштрихованных районов со сложной или плохо освещенной в метеорологическом отношении территорией).

Уточняются рекомендации, представленные в ПНАЭ.

Главным направлением совершенствования нормативной базы, по мнению многих специалистов, является введение в нее параметров, учитывающих влияние ожидаемых изменений климата. Однако такая задача является чрезвычайно сложной проблемой по многим причинам. Одна из основных причин — неопределенности результатов моделирования, используемых в условиях многовариантности развития экономики будущего, и оценки влияния изменений климата на экономику. Кроме того,

следует учитывать необходимость преодоления существующих традиций строительного проектирования зданий и сооружений. В частности, возникают затруднения при использовании для проектирования информации в вероятностной форме.

Представляется, что императивом решения данной проблемы является расчет рисков доверия потребителей к прогнозу, включаемому в нормативный документ.

Обычно применяемые для расчета рисков методы, например методический аппарат, известный из литературы (Стратегические риски России, 2005), авторская методика расчета рисков, создаваемых опасными явлениями (ОЯ) (Кобышева и др., 2008), а также байесовский подход, применяющийся при синоптических прогнозах (Хандожко, 2005), в данном случае непригодны.

Для оценки риска доверия климатическому прогнозу предлагается специальная методика. Она опирается на теорию нестрогой логики (Заде, 1965), которая позволяет получить не точные, а приближенные оценки риска. Связано это с тем, что по мере роста сложности системы постепенно уменьшается возможность делать точные и в то же время значимые утверждения относительно ее поведения. Именно так обстоит дело с климатической системой.

Согласно методике, рассматривается возможность попадания прогнозируемого значения специализированной метеорологической характеристики в некоторый нечеткий кластер с «размытыми», случайными границами. При этом оценивается не вероятность попадания в данный кластер, а степень принадлежности к кластеру с нечеткими границами. Вместо функции распределения, принятой в теории вероятностей, определяется функция принадлежности прогнозируемой величины к нестрогому кластеру. Область значений климатической характеристики выражается в виде единичного интервала с границами 0 и 1. Значения в этом интервале соотносятся с функцией принадлежности к некоторой лингвистической переменной, обозначаемой  $\mu(x)$ . Лингвистическими переменными служат «величина риска» (высокий, средний, низкий риски) и «степень влияния риска» (значительное, нейтральное, слабое). Последнюю переменную можно считать степенью оценочной уверенности риска и выразить в долях



единицы. Результат может выглядеть, например, следующим образом: «характеристика имеет средний уровень риска со значительной степенью уверенности 0,8». В случае низкого и среднего риска с большой степенью уверенности прогнозируемой характеристике, как правило, можно доверять.

Исследование, проведенное Л. П. Галюк по оценке целесообразности использования прогнозируемых средних месячных температур по Санкт-Петербургу, показало, что средние месячные зимние и летние температуры можно принимать как достаточно надежные, в то время как риск использования осенних и весенних температур в качестве прогноза очень велик.

## **2. Импактные исследования изменения климата**

В условиях когда на первый план выступает необходимость оценки возможных изменений климата и последствий этих изменений для различных секторов экономики, специалист по прикладной климатологии обязан достаточно ясно представлять себе весь процесс влияния климатических факторов на соответствующий объект технической системы или социальной и экономической сферы. Сложность таких процессов можно проиллюстрировать на примере оценки последствий изменения снеговых нагрузок.

По данным Госстроя, ежедневный рост аварий (особенно, сборных и железобетонных конструкций) в последние годы достигает 18—40 % (Белый, 2007). Значительную часть этих аварий составляет обрушение покрытий производственных зданий под влиянием комплекса причин, одной из которых, и часто решающей, являются снеговые нагрузки. Так, в Магнитогорске возрастание снеговой нагрузки на 30 % привело к обрушению здания. По этой же причине произошло разрушение покрытия промышленного парка в Шереметьево, а также возникло «расхождение» одной секции (24 м) в новом покрытии Ленинградского вокзала.

Причины, приводящие к «занормативным» нагрузкам, достаточно банальны и обусловлены тем, что, когда в начале весны снег превращается в лед, происходит значительное утяжеление конструкции. Поэтому, если при прогнозируемом потеплении масса снега на поверхности земли уменьшится, нет оснований считать,

что снеговая нагрузка на покрытия также пропорционально уменьшится. Весной при более интенсивном потеплении внизу, у крыши, под снегом образуется «ледяная корка» и нагрузка возрастает. Кроме того, в случаях когда у зданий имеются пристройки, на крыше образуются «снежные мешки». Вводится ряд дополнительных поправок, например на снос снега при метелях.

Приведенный пример показывает, что процесс оценки последствий в области снеговых и других нагрузочных воздействий является достаточно сложным и требует специальных исследований климатолога высокой квалификации и направленной специализации в каждом конкретном случае.

### **3. Стратегия принятия климатообусловленных решений**

Принимая любое решение как в производственной, так и в социальной сфере, необходимо предварительно выяснить его целесообразность. Поскольку вынужденные превентивные и адаптационные действия требуют больших средств, необходимо разработать определенную стратегию реагирования на негативные последствия изменения климата, используя при этом принцип разумной достаточности. Всякая стратегия действий потребителей на основе учета климатических данных определяется соотношением стоимости адаптационной или превентивной меры ( $C$ ) потерь вследствие изменения климата ( $L$ ). Адаптационные меры следует принимать только в том случае, когда соотношение  $C/L$  меньше единицы. Тогда производственное решение будет экономически выгодным.

Методика оптимизации хозяйственного решения достаточно хорошо разработана на основе системного подхода к его концептуальной части (Хандожко, 1999) применительно к прогнозам погоды. Она может быть частично перенесена на процесс принятия решений при изменениях климата, прогнозируемых с помощью моделей с высоким пространственно-временным разрешением. Не останавливаясь на описании данной методики, находящейся в зависимости от качества прогнозов погоды, заметим, что для реализации ее применительно к нашей проблеме необходимо:

количественно оценить последствия влияния на рассматриваемый объект меняющегося климата, выделив неблагоприятные эффекты, угрозы катастроф и катаклизмов;

определить риск доверия результатам моделирования изменений климата;

рассчитать погодно-климатический риск ущерба объекту при изменении климата (ущерб при этом представляется в стоимостном выражении).

Методы стоимостной оценки неблагоприятных и опасных явлений в долях ВВП представлены в работе Галюк, Панфутовой (2008).

Оптимальная стратегия реагирования на макроэкономические (т.е. в масштабе всей страны) последствия изменений климата должна согласовываться со стратегиями развития основных секторов экономики, и прежде всего энергетики.

#### **4. Стратегия климатологического обеспечения энергетики**

Поскольку энергоемкость отечественного ВВП более чем в три раза превышает показатели технологически развитых стран (Земцов, 2005), важнейшими стратегическими ориентирами действующей энергетической стратегии до 2020 г. (ЭС-2020) являются энергетическая безопасность, энергетическая эффективность экономики, экономическая (бюджетная) эффективность энергетики и экономическая безопасность (Яновский, 2008).

Для достижения стратегических ориентиров важнейшим механизмом государственного регулирования в сфере ТЭК (наряду с рядом других более общих) является введение системы перспективных технических регламентов, национальных стандартов и норм, повышающих управляемость процессами развития энергетики и стимулирующих энергосбережение. Одним из вытекающих из стратегических установок вектором является развитие инфраструктуры.

Согласно утвержденной Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2020 г., установленная мощность атомных и угольных станций возрастет более чем в два раза, гидроэлектростанций — более чем на 45 %, газовой генерации — более чем на 40 %. До 2020 г. сохранится стабильное лидерство ископае-

мых углеводородов (доля не ниже 80 %) с увеличением использования природного газа и каменного угля.

В соответствии с энергостратегией все большая роль отводится восточным регионам страны как новой крупной базе развития нефтегазового комплекса с учетом возможного экспорта газа на рынки Китая и других стран азиатско-тихоокеанского региона. В результате должны быть сформированы новые региональные центры газодобычи — Сахалинский, Якутский, Иркутский и Красноярский — на базе месторождений шельфовой зоны Сахалина, Чардинского и Ковыктинского, месторождений Красноярского края. Кроме того, Россия получает уникальный исторический шанс упреждающего технологического прорыва к природным кладовым газа в Арктике.

Обновленная энергетическая стратегия должна, кроме того, дать новый импульс развитию нетрадиционной энергетики, а также безопасной атомной и малой гидроэнергетики.

Из указанных особенностей стратегии энергетики России вытекает ряд направлений развития прикладной климатологии на ближайшее время.

Во-первых, акцент должен быть сделан на разработку специализированных климатических характеристик и нормативов, которые следует принимать в расчет при оценке влияния климатических факторов на ТЭК, и особенно на проектирование и эксплуатацию нефтегазового комплекса и атомных станций. Реестр основных СКП, как и методика их расчета, содержится в Руководстве по специализированному климатологическому обслуживанию экономики (Руководство, 2008), но требует дальнейшего расширения и детализации.

Основной ущерб в нефтегазовой отрасли причиняется в случае длительных периодов с экстремальной температурой воздуха, при повышенной изменчивости температуры во времени и по территории, при длительных и интенсивных дождях и снегопадах, обильных паводках, частых ОЯ (прежде всего, гроз, смерчей, сильного ветра и гололеда). В результате происходят аварии вследствие образования коррозии трубопроводов (преимущест-

венно промысловых), некачественного проведения изоляционно-укладочных работ, ограничения и прекращения подачи газа при перерывах в энергоснабжении компрессорных станций в случаях аварий на ЛЭП и сильных, длительных морозов, а также затопления отрезков трубопроводов вследствие аварийных сбросов из водохранилищ ГЭС.

Во-вторых, ввиду перспективности развития нетрадиционной энергетики большое внимание должно уделяться обеспечению климатической информацией альтернативной энергетики и оценке климатических ресурсов. Стоимостные оценки климатических ресурсов позволяют ввести их характеристики в экономический анализ (например, включить их оценки в стоимость участков земли, жилища, сельскохозяйственных культур и т.п.). Концепция климатических ресурсов, подробно изложенная в Энциклопедии климатических ресурсов (2005), обсуждалась на конференции ВМО «Климат как ресурс» и принята комиссией по климатологии ВМО. В соответствии с решением ККЛ-XXIV ВМО предлагается составить справочники климатических ресурсов стран-членов ВМО.

Наиболее климатозависимыми и перспективными являются ветро- и гелиоресурсы. Преимуществом ветроэнергетических станций (ВЭС) по сравнению с традиционными ЭС является быстрый ввод мощностей, возможность наращивания ВЭС по модульной схеме, значительная экономическая эффективность. За последние 25 лет стоимостные показатели ВЭС очень сильно снизились. Во многих странах ВЭС весьма востребованы. Россия же, по мнению зарубежных менеджеров, ведет себя стратегически недальновидно. Лишь недавно отношение к ветроэнергетике начало меняться. В связи с ожидаемым увеличением скорости ветра потенциальные ветроэнергетические ресурсы будут возрастать (Борисенко, 2007) и к 2030 г. могут достигнуть 10—15 % всего энергопотребления страны.

В южной части России (Краснодарский край, Приморье) будущее принадлежит гелиоэнергетике. В теплую половину года до 80 % органического топлива, используемого для выработки энер-

гии, может быть замещено солнечной энергией (Стадник и др., 2009). Специализированная информация для обеспечения гелиоэнергетики в основном получена и успешно реализуется по мере поступления запросов потребителей. Изменения климата коснутся гелиоэнергетики сравнительно мало.

Современное состояние других возобновляемых источников энергии (ВИЭ) — малой гидроэнергетики, источников геотермальной, приливной, биоэлектрической энергии, низкопотенциального тепла — представлено в технической литературе. В работе Васильева (2008) приводятся картографические материалы потенциальных ресурсов этих ВИЭ. Однако какая-либо информация о зависимости ВИЭ от климата и возможности их развития в условиях меняющегося климата в литературе отсутствует. Поэтому важной задачей является выявление таких зависимостей, количественная оценка потенциала всех ВИЭ и вес каждого из них в различных климатических областях.

Технологии выработки энергии ВИЭ, являясь более экологичными по сравнению с технологиями получения традиционных видов энергии, тем не менее обладают рядом недостатков. Например, считается, что ВЭУ наносит вред животным и птицам. К недостаткам ВЭУ относятся также шум ветротурбин, создание стробоскопического эффекта при низком закаты солнца, создание помех радио- и телевизионному приему, малая плотность потока и изменчивость его во времени. Правда, предпринятые усилия позволили к настоящему моменту либо устранить, либо, по крайней мере, уменьшить многие из этих недостатков.

При эксплуатации грунтового теплообменника может возникнуть ситуация, когда потребление тепловой энергии теплонасосами из грунтового массива к концу отопительного сезона вызывает вблизи регистра труб системы теплосбора понижение температуры грунта, которое на большей части территории России не успевает компенсироваться в летний период. Понижение температуры грунтового массива следует учитывать при проектировании тепловых насосов и при определении режима эксплуатации. Научно-технические инновации должны быть направлены также на снижение возникающих при эксплуатации ВИЭ рисков.

## **5. Стратегия климатологического обеспечения строительства и наземного транспорта**

Ведущим направлением стратегии развития строительной индустрии является энергоэффективность строящихся зданий и сооружений. В целях экономии дорогостоящего топлива принята ориентация на увеличение теплозащиты зданий (утолщение ограждающих конструкций).

Повышение средней за зиму температуры воздуха на 2 °С позволяет уменьшить теплозащиту на 20 % (Малявина и др., 1986). Тем не менее в соответствии со стратегией развития строительства, несмотря на ожидаемое повышение средней зимней температуры воздуха к середине XXI столетия, теплозащита зданий не будет меняться, зато при этом увеличится экономия топлива. Преимущество такого решения очевидно. Вместе с тем, сокращение отопительного периода, которое по оценкам к середине XXI столетия составит 14—16 дней и повышение средней температуры отопительного периода не приводят к большой экономии средств. При существующей системе отопления, во-первых, внутри отопительного периода возрастет число дней с температурой выше 8 °С, т. е. дней с затратным отоплением, и, во-вторых, до наступления отопительного периода (т. е. устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 8 °С) появятся дополнительные дни с температурой ниже 8 °С, что, скорее всего, приведет к дополнительному расходу электричества.

Ожидаемое потепление не приводит к сколько-нибудь значительному повышению безопасности и бесперебойности работы сухопутного транспорта, что является главным пунктом стратегии его развития — скорее, наоборот. Увеличение повторяемости ОЯ, числа аварий и задержек при повышении скользкости дорог вследствие потепления и деформации авто- и железнодорожных магистралей при таянии вечной мерзлоты, а также таяние «зимников» — основных путей сообщения на севере России — все это заметно ухудшит ситуацию на транспорте.

В условиях меняющегося климата в выигрыше окажутся те сферы экономики, которые будут способны к быстрым адаптационным перестройкам в соответствии с ожидаемыми изменениями природной среды.

## 6. Погодно-климатические риски

Главная роль среди изменяющихся климатических факторов, создающих риски как для ТЭК, так и для экономики в целом, безусловно, принадлежит природным катастрофам и опасным гидрометеорологическим явлениям. Территория России и расположенные на ней многочисленные объекты энергетики и других отраслей хозяйства подвержены разрушительным воздействиям практически всех типов опасных гидрометеорологических процессов. Особенно тяжелые последствия возникают при наводнениях во время весенних половодий при заторах льда, при весеннем снеготаянии, из-за обильных дождевых осадков преимущественно в летне-осенний период. К катастрофическим затоплениям обширных территорий, объектов экономики, гибели людей, прекращению некоторых видов производственной деятельности могут приводить разрушения гидротехнических сооружений.

От природных пожаров, участившихся в последнее время, ежегодно погибает от 60 до 100, а иногда и более человек. Ущерб от природных пожаров составляет в среднем 136 млн долларов в год (Стратегические риски, 2005).

Почти на всей территории России возможны ураганные ветры, смерчи и шквалы. Смерчи наиболее часто возникают в Центральном и Центрально-Черноземном экономических районах, а также на побережье Черного моря. Ураганные и шквальные ветры особенно характерны для открытых побережий морей и крупных водохранилищ страны, а также предгорных районов. Повторяемость катастрофических ураганов, смерчей и шквалов составляет около 4—5 случаев в год.

Риски, создаваемые опасными гидрометеорологическими явлениями на территории России, очень велики. Они возрастают в связи с техническим прогрессом и одновременным наличием отработавшего ресурс оборудования в различных секторах экономики, несанкционированным проведением некоторыми организациями земляных работ в охраняемых зонах газопроводов, строительством с грубыми нарушениями требуемого предельного расстояния до газопровода.



Серьезной опасности при возникновении ОЯ подвергаются угольные шахты, где происходят взрывы метана, угольной пыли, самовозгорание, гидротехнические сооружения и многие другие виды производственных и военных объектов.

Таким образом, анализ, прогноз и управление погодноклиматическими рисками имеют исключительно важное значение для инноваций адаптационного характера, необходимых вследствие изменения климата. Концепция управления безопасностью в целом складывается из следующих положений:

- учета всех негативных последствий (ОЯ, НГЯ, изменений климата);

- приоритета принципа сохранения жизни людей, зданий и сооружений;

- принятия риска, отличного от нуля;

- учета приемлемого риска для выбора мер безопасности по принципу разумной достаточности соотношения между выгодами и затратами.

Адаптационные мероприятия, направленные на предупреждение и смягчение рисков, разрабатываемые в рамках прикладной климатологии, должны решать следующие задачи:

- на этапе проектирования объектов обеспечивать достаточную прочность и устойчивость сооружений, что достигается пересмотром и совершенствованием нормативных документов; вести специализированный мониторинг;

- на этапе эксплуатации объектов снижать вероятность аварий и при необходимости локализовать их (например, при разливах нефти диагностировать область разлива, что позволит принять меры по ограничению данной области); контролировать остаточные риски.

Методология оценки погодноклиматических рисков в окончательном варианте не разработана, несмотря на публикации отдельных методов и результатов расчета рисков, создаваемых некоторыми ОЯ (Галюк, 2007).

В работе Панфутовой (2008) риски, возникающие при смерчах на территории России, доведены до их стоимостного выражения. Цена риска составляет в различных субъектах Российской Федерации от 10 тыс. до 700 тыс. руб. на 1 км<sup>2</sup>.

С проблемой рисков потерь, обусловленных опасными явлениями на фоне нарастающей климатической неустойчивости, тесно связан уровень уязвимости производственной сферы. Комплексное понятие уязвимости, выражаемое в масштабах экономических потерь, охватывает не только климатические показатели, но и макроклиматические характеристики. В связи с бессистемностью, недостаточностью и ненадежностью фактических сведений об ущербах предпринимаются попытки косвенного приближенного выражения уязвимости (Кобышева, Галюк, 2008).

### Заключение

Основу методов заблаговременной адаптации секторов экономики к новым климатическим условиям составляет оценивание ресурсного потенциала и рисков.

Улучшение качества воспроизведения региональными моделями экстремальных событий, а также вариаций детализированных климатических характеристик открывает новые перспективы для оценки климатических ресурсов и рисков, а также оптимизации климатообусловленных решений, связанных с изменением климата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белый Г. И., 2007. Некоторые технические и организационные меры, направленные на снижение риска аварий зданий и сооружений. В сб.: Доклады V Международной конференции «Актуальные проблемы промышленной безопасности: от проектирования до страхования», 6—7 июня 2007 г., Санкт-Петербург. — СПб., Городской центр экспертиз, с. 61—66.

Борисенко М. М., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л., 2007. Оценки ветроэнергетических ресурсов на территории России. — Труды ГГО, вып. 557, с. 53—67.

Васильев Ю. С., Безруких П. П., Елистратов В. В., Сидоренко Г. И., 2008. Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России / Учебное пособие. — СПб., изд. СПбГТУ. — 250 с.

Галюк Л. П., Самолетова Н. А., 2007. Оценка риска, создаваемого смерчами для Волгодонской АЭС. — Труды ГГО, вып. 557, с. 225—230.

Дроздов О. А., 1952. О состоянии и перспективах развития климатологии. — Метеорология и гидрология, № 12, с. 3—11.

Земцов А. Н., 2003. Энергосбережение в строительстве и стоимость теплового прожиточного минимума. — Современные строительные конструкции: Окна и двери, № 5, с. 24—26.

Кобышева Н. В., Галюк Л. П., Панфутова Ю. А., 2008. Методика расчета социального и экономического рисков, создаваемых опасными явлениями погоды. — Труды ГГО, вып. 558, с. 162—172.

Кобышева Н. В., Стадник В. В., Борисенко М. М., Трофимова О. В., 2009. Влияние меняющегося климата на энергетику Республики Беларусь. — Метеоспектр, № 2, с. 109—113.

Малявина Е. Г. и др., 1986. Влияние изменения температуры воздуха на теплозащиту зданий / Отчет по НИР. — Л., изд. ГГО. — 78 с.

Нечеткие множества и теория возможностей, 1986 / Пер. с англ. под ред. Р. Ягера. — М.: Радио и связь. — 408 с.

Панфутова Ю. А., Самолетова Н. А., Макеева О. Д., Романова И. В., 2007. Опасные явления погоды на равнинной части Российской Федерации — Труды ГГО, вып. 556, с. 145—156.

Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики, 2008. — СПб: Астерион.

Стратегические риски России: оценка и прогноз / МЧС России, 2005 / Под общ. ред. Ю. Л. Воробьева. — М.: Деловой экспресс. — 392 с.

Хандожко Л. А., 1999. Оптимальные погодно-хозяйственные решения. — СПб., изд. РГГМУ. — 162 с.

Энциклопедии климатических ресурсов Российской Федерации, 2005. — СПб: Гидрометеоздат. — 319 с.

Яновский А. Б., 2008. Энергетическая политика России. — Академия энергетика, № 3 (23), с. 4—9.

Zadeh L. A., 1965. Fuzzy sets. — *INFO, CONTROL*, V. 8, p. 338—353.

УДК 551.509.59

**ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ПОЛЕЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ  
В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ МОСКВЫ**

*Л. А. Хандожко<sup>1</sup>, А. Г. Тимофеева<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> ГОУ ИПК Росгидромета  
143980 Московская область, г. Железнодорожный,  
ул. Гидрогородок, д. За  
e-mail: ipkfin@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.06.2009, после доработки 18.09.2009

**1. Введение**

Проблемы энергосбережения и повышения энергоэффективности относятся к основным проблемам современной экономики и имеют международный характер. Впервые эти вопросы были подняты на заседании глав государств стран «G-8» в Хайлигендаме. Затем они получили активное развитие в рамках саммита, посвященного проблеме энергообеспечения, который состоялся в Санкт-Петербурге в 2006 г. Россия, как и остальные страны, согласовала итоговые документы с рекомендациями по энергосбережению и повышению энергоэффективности.

Главным мотивом энергосбережения должно быть сохранение окружающей естественной среды и даже ее улучшение, а также защита интересов будущих поколений в отношении сохранения традиционных природных источников энергии, но уже как сырья для химической и медицинской промышленности. В обществе не определена законодательным образом ценность энергии как стратегического сырья и как собственности будущих поколений. Как известно, президент России Дмитрий Медведев (Послание Президента России, 2008) поставил цель до 2020 г. снизить энергоемкость российской промышленности на 40 %.

## 2. Современное состояние энергопотребления и энергосбережения

Мировое потребление энергии постоянно возрастает, опережая по темпам роста прирост народонаселения. Только за период 1975—2005 гг. было использовано столько же энергоресурсов, сколько за все предшествующее время существования цивилизации. По самым скромным прогнозам, энергопотребление в мире увеличится в 2 раза к 2050 г. и в 2,5 раза к 2100 г. В настоящее время примерно 90 % мировой энергии дает органическое топливо, 60 % которого составляют нефть и газ — невозобновляемые природные ресурсы.

Экспоненциальный характер роста потребления энергии создает экологические проблемы, представляющие реальную угрозу выживанию человечества. Действующая модель количественного развития энергетики за счет невозобновляемых ресурсов исчерпала себя. Прогноз мирового энергетического баланса на нынешнее столетие, основанный на обобщении экспертных оценок специалистов о потенциале развития каждой отрасли и общих закономерностях развития экономики, содержит следующие основные тенденции (без учета революционных научных открытий, таких как термоядерная энергия, энергия космоса, энергия глубоких слоев Земли и т. д.):

резкое увеличение применения нетрадиционных источников энергии (к середине века в 10 раз, к концу века в 100 раз) как альтернативы нефти и газу позволит снизить долю последних до 50 %, а затем до 20 %, что потребует 16 триллионов долларов инвестиций;

рост добычи угля может быть увеличен в 2,6 и 4 раза соответственно при условии освоения «чистых» угольных технологий и угольно-водородного производства;

«ядерный» сценарий предполагает увеличение производства электроэнергии на АЭС в 4 и 10 раз соответственно при переходе на реакторы на быстрых нейтронах и создании при АЭС мощного производства водорода.

Из вышесказанного видно, что новейшие технологии позволят человечеству преодолеть сложившуюся в настоящее время

тупиковую ситуацию, но для кардинального решения проблемы потребуются гигантские финансовые затраты и, главное, многие и многие десятилетия. С позиций ближайшего будущего это пока еще, образно говоря, «журавель в облаках». Связующим звеном для всех источников энергии, позволяющим наиболее эффективно ее использовать, является энергосбережение — приоритетное направление в развитии мирового сообщества (Климатические изменения, 2003; Международная конференция, 2003).

Энергосбережение в перспективе представляется неисчерпаемым, поскольку оно охватывает новые страны и сферы деятельности и одновременно подпитывается новыми научно-техническими достижениями и инструментами воздействия на поведение потребителей.

Так, принятая в 2003 г. Энергетическая стратегия России (Распоряжение Правительства Российской Федерации, 2003) предусматривает получить к 2020 г. 2/3 прироста продукции за счет энергосбережения; при этом наиболее весомым является структурный фактор в экономике.

Существуют три способа снижения потребления энергии: перевод нерационального потребления энергоресурсов в режим оптимального использования, устранение технологических и технических потерь, повышение эффективности производства.

Теплоэнергетика как специфическая отрасль экономики и особая инфраструктура хозяйственной деятельности полностью зависит от погодо-климатического фактора. Климат в целом и его реализация в погодных условиях существенно определяют различия погодозависимости теплоэнергетики. Учет таких информационных природных ресурсов, как прогноз температуры воздуха и скорости ветра, занимает в теплоэнергетике ведущую роль. Адаптация под ожидаемую погоду в сущности и определяет эффективность теплоисточника с точки зрения ресурсопотребления, а значит, и ресурсосбережения. Система централизованного теплоснабжения состоит из трех основных компонентов: теплоисточника (ТЭЦ, ГРЭС и др.), тепловой сети и потребителей (систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и технологических систем).

### 3. Погодо-климатические ресурсы в теплоэнергетике

Гидрометеорологическая информация имеет важное значение в различных отраслях экономики любой страны. В период развития экономики страны возрастает экономический эффект от своевременных и правильных решений по использованию гидрометеорологической информации. Международная практика показывает, что умелое и своевременное использование гидрометеорологической информации позволяет многим секторам национальной экономики оптимизировать повседневную деятельность, что способствует социальному и экономическому благополучию (Кобышева и др., 2004; Кобышева, 2005).

В современном мире все более очевидна нарастающая социальная и техногенная зависимость общества от условий погоды и изменений климата. Об этом свидетельствуют зарубежные и отечественные исследования, данные, публикуемые в работах ВМО, сведения о погоде и климате последних лет. Именно поэтому знания о текущей и ожидаемой погоде и климате выступают как важнейший информационный ресурс в хозяйственной практике и социальной сфере (Исаев и др., 2002). Другими словами, экономическая целесообразность использования прогнозов погоды и гидрометеорологической информационной продукции в целом неоспорима.

Для того чтобы метеорологическая информация могла стать составной ресурсной частью того или иного производства, необходимо знание основных характеристик этого производства, его специфики, что позволяет правильно оценивать необходимую потребителю метеорологическую информацию: ее объем, точность, критические границы, частоту передачи, форму представления и другие параметры.

Для успешной реализации на практике метеорологических сведений недостаточно лишь довести их до потребителя. Возникает необходимость двустороннего обмена информацией между потребителем и метеорологом для принятия оперативного решения о действиях, которые будут экономически наиболее выгодны при ожидаемых условиях погоды или уже известных климатических параметрах.

Внедрение научных методов использования метеорологической информации, и прежде всего прогнозов погоды, позволяет значительно снизить издержки в экономике страны за счет влияния погодных условий. Наряду с климатической информацией метеорологические прогнозы находят все более широкий спектр потребителей.

В последнее десятилетие в системе Росгидромета проблеме повышения экономической эффективности использования метеорологической информации стало уделяться все большее внимание (Бедрицкий, Хандожко, 2001). Научная основа оценки экономической эффективности метеорологической информации продолжает развиваться, базируясь главным образом на положениях теории вероятности и математической статистики. Некоторые задачи решаются с привлечением математико-экономического моделирования, теории оценивания, сетевого планирования и ряда других разделов математики. Влияние метеорологического фактора на производство тепловой энергии прослеживается на всех этапах функционирования ТЭЦ и сказывается непосредственно на задании режима работы теплоисточника, на колебаниях спроса на тепловую энергию, а также на условиях эксплуатации и содержания тепловых сетей.

При выборе режима отопления следует учитывать совместное влияние температуры воздуха, скорости ветра и солнечной радиации на теплопотери зданий. Оптимизация использования прогнозов температуры воздуха направлена на минимизацию потерь, которые возможны в непрерывном функционировании ТЭЦ.

#### **4. Оценка экономической полезности прогнозов температуры воздуха для теплоэнергетики Москвы**

В Москве значительная часть тепла производится в наиболее экономичном комбинированном цикле совместной выработки электрической и тепловой энергии, хотя реальную долю теплофикации определить трудно из-за отсутствия данных об объемах выработки тепла на ТЭЦ в пиковых водогрейных котлах. В системе централизованного теплоснабжения большое распространение получили ТЭЦ — предприятия по комбинированной выра-



ботке электроэнергии и теплоты. Технологически ТЭЦ ориентированы на приоритет электроснабжения. Попутно производимое тепло востребовано в большей степени в холодный период года и в теплый период сбрасывается частично в окружающую среду (Липовских, 1999). Система централизованного теплоснабжения охватывает 96 % потребителей. Централизованная система теплоснабжения Москвы — самая крупная в мире.

Исходные данные, на основании которых нами выполняется исследование успешности и экономической полезности прогнозов температуры воздуха для теплоэнергетики Москвы, включают информацию двух видов: метеорологическую (фактические и прогностические сведения о температуре воздуха у поверхности Земли) и теплотехническую (теплотехнические характеристики ТЭЦ Москвы).

Для задания соответствующей нагрузки теплоисточнику устанавливается необходимое значение температуры теплоносителя в соответствии с прогнозом температуры наружного воздуха. Наблюдаемые отклонения от температурного графика вызваны такими факторами, как неточность контроля расхода тепла в теплосистеме, а также возможными ошибками в прогностической информации, поступающей на ТЭЦ. На основании прогноза среднесуточной температуры воздуха устанавливается такой тепловой режим выдачи прямой воды ( $t'$ ), при котором потребители должны быть обеспечены необходимым теплом. В действительности идеальная подстройка невозможна в связи с большими расстояниями в системе передачи (транспортировки) тепла.

Задание теплового режима работы ТЭЦ в зависимости от масштабов тепловой сети происходит один или два раза в сутки. Для этого используются прогноз (П) среднесуточной температуры воздуха в данном пункте или прогноз средней температуры воздуха на 12 ч.

При транспортировке исходного теплового состояния теплоносителя требуются многие часы работы теплоисточника (и тепловой сети), чтобы донести тепло до «крайних» потребителей. Протяженность тепловой сети любой ТЭЦ, обеспечивающей теплом крупный район города, может составлять десятки километ-

ров. Чем больше расстояние трубопроводной передачи тепла, тем больше времени требуется для его «прокачки» в теплосети.

Согласно разработкам (Хандожко, 2005; Хандожко, Вдовин, 1989; Хандожко, 2006) в целях оптимизации выработки тепловой энергии используется прогноз среднесуточной температуры воздуха в данном пункте. По выбранному пункту рассчитываются прогностические  $t_{пр}$  и фактические  $t_{ф}$  среднесуточные значения температуры воздуха. На этом основании разрабатываются матрицы сопряженности методических и инерционных прогнозов (Хандожко, 2005). Прогностические  $t_{пр}$  и фактические  $t_{ф}$  значения для матрицы сопряженности инерционных прогнозов устанавливаются только по фактическим материалам. В качестве фактических значений температуры воздуха за рассматриваемый период используются данные метеорологической станции Москва, ВДНХ.

Установленная тепловая мощность всех ТЭЦ Москвы составляет 33 320 Гкал/ч (по данным на последние годы предшествующего столетия), протяженность магистральных тепловых сетей диаметром более 450 мм превышает 2 тыс. км.

Расположение теплоисточников в Москве и Московской области приведено на рис. 1. АО «Мосэнерго» располагает двумя крупнейшими тепловыми электростанциями: ТЭЦ-22 (установленная мощность 3584 Гкал/ч) и ТЭЦ-21, расположенной на севере города (установленная мощность 4603 Гкал/ч). В целях идентификации экономической полезности прогнозов температуры воздуха для теплоэнергетики Москвы были использованы фактические и прогностические метеорологические данные по станции ВДНХ и необходимые теплотехнические характеристики ТЭЦ-21 и ТЭЦ-22.

Реализация методических прогнозов позволяет решить ряд производственных задач, в частности регулировать рабочую мощность теплоисточника, поддерживать необходимую температуру теплоносителя, но главное, обеспечить оптимальную экономию топлива. Это означает, что необходимо, с одной стороны, постоянно адаптироваться к ожидаемым, нередко значительным колебаниям температуры воздуха и скорости ветра и обеспечивать

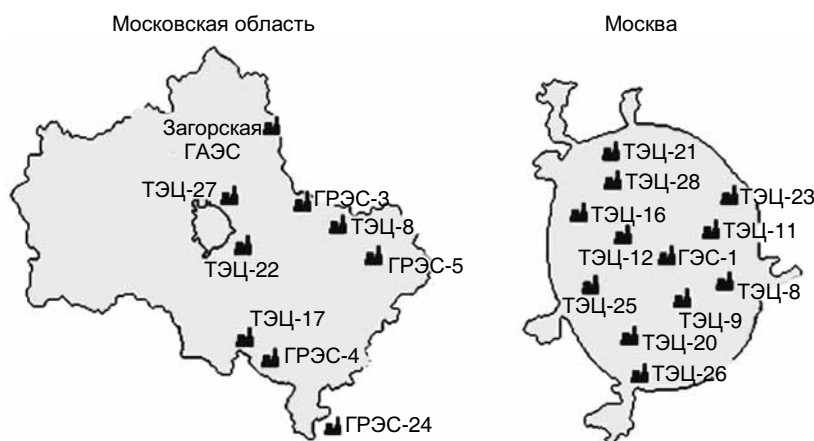


Рис. 1. Расположение теплоисточников в Москве и Московской области.

вать температуру в жилых помещениях не ниже  $18^{\circ}\text{C}$ , а с другой — не расходовать лишнего топлива при ожидаемых понижениях наружной температуры.

Зависимость отпуска тепла на отопление от погодных условий позволяет установить метеорологические потери ТЭЦ. Эти потери возникают вследствие отклонения фактических погодных условий от тех условий, в расчете на которые планируются хозяйственные мероприятия (Хандожко, 2005). Вследствие значительной инерционности подачи теплоносителя (недостаточно высокой пропускной способности) не представляется возможным установить температуру воды в отопительной сети в каждый момент времени, точно соответствующую фактическим погодным условиям. В связи с этим режим выработки тепла устанавливается с некоторым упреждением, ориентируясь на среднюю температуру воздуха.

Оценка экономической полезности прогнозов была выполнена по информации за период с 2003 по 2008 г., т. е. за пять отопительных периодов. При этом были составлены матрицы сопряженности прогнозов температуры воздуха, дана оценка адекватности прогностических значений фактическим, определены функции тепловых и стоимостных потерь для АО «Мосэнерго».

Расчет осуществлялся при установленной тепловой мощности АО «Мосэнерго»  $Q_p^T = 33\ 320$  Гкал/ч и соответственно расчетная температура воздуха  $t_p$  для Москвы принималась равной  $-26$  °С. Температура воздуха внутри отапливаемых помещений определяется значением  $t_n = 18$  °С. Средняя температура воздуха за отопительный сезон для Москвы составила  $\bar{t}_{от} = -3,6$  °С. Значительная неоднородность климатических и погодных условий проявляется в выборе известного в теплоэнергетике показателя расчетной температуры ( $t_p$ ) наружного воздуха.

Расчетная температура воздуха определяется по формуле Чаплина (Заварина, 1976):

$$t_p = 0,4t_{cx} + 0,6t_{ам}, \quad (1)$$

где  $t_{cx}$  — средняя температура воздуха за самый холодный месяц;  $t_{ам}$  — абсолютный минимум температуры воздуха. Температура воздуха, необходимая в отапливаемых зданиях ( $t_n$ ), принимается равной  $18$  °С.

Расчетная температура как климатический показатель используется при определении максимальной нагрузки теплоисточника ( $Q_p^T$ ), в расчетах теплопередачи ограждающих конструкций и в решении ряда других задач теплотехники.

Использование оперативных прогнозов температуры воздуха является обязательным условием функционирования такой «производственной» организации, как теплоисточник (ТЭЦ, ГРЭС и др.). Правильный прогноз резких изменений температуры воздуха позволит избежать крупных потерь, перерасхода или недодачи тепла. Совершенно ясно, что ожидаемые значения температуры воздуха, на которые должен ориентироваться диспетчер ТЭЦ, не всегда будут совпадать с фактическими. Использование в теплоэнергетике метеорологических прогнозов, необходимых для задания режима работы ТЭЦ, рассматривается как технология оптимального учета метеорологических (погодных) ресурсов в целях минимизации тепловых потерь, а значит, экономии топливных ресурсов.

Задача, прежде всего, сводится к нахождению некоторой функции, которая связывала бы затраты тепла на отопление с температурой наружного воздуха. Регулирование отопления при использовании прогнозов температуры воздуха сопровождается ошибками, вызывающими перерасход (избыточное теплоснабжение) или недодачу тепла (недостаточное теплоснабжение), что, в свою очередь, является следствием ошибочности оперативных прогнозов температуры воздуха, на которые ориентируется потребитель. Отсюда очевидна необходимость разработки функции тепловых потерь ТЭЦ при известных ее характеристиках, которая отражает последствия учета условий погоды в регулировании работы теплоисточника.

Оптимальный режим работы ТЭЦ возможен только в том случае, если определена зависимость тепловых потерь от метеорологических условий. Принципиальная основа задания теплового режима в теплосети состоит в том, что необходимое по прогнозу  $t_{\text{пр}}$  количество тепла  $Q_{\text{ф}}$ , которое фактически вырабатывается на ТЭЦ, должно соответствовать расчетному значению тепла  $Q_{\text{р}}$ , точно отвечающему температуре воздуха  $t$ , осуществившейся по истечении периода прогнозирования.

Расход тепла  $Q_{\text{р}}$  в данной отопительной сети определяется в зависимости от температуры наружного воздуха по формуле

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{р}}^T \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{ф}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{р}}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{р}}^T$  — мощность теплоисточника (ТЭЦ) — тепловая нагрузка, отвечающая расчетной температуре воздуха  $t_{\text{р}}$ ;  $t_{\text{ф}}$  — фактическая температура воздуха.

Фактический расход тепла  $Q_{\text{ф}}$  отличается от необходимого  $Q_{\text{р}}$ , что может быть вызвано погрешностями регулирования отпуска тепла при нестационарных режимах в системе теплоснабжения и погрешностями прогнозирования температуры воздуха ( $\Delta t_{\text{пр}} = t_{\text{пр}} - t_{\text{ф}}$ ).

Отсюда отклонения расхода тепла  $\Delta Q$  можно представить в виде

$$\Delta Q = Q_{\phi} - Q_p. \quad (3)$$

Будем рассматривать тепловые потери ТЭЦ в отопительный период как нерациональное расходование тепла по отношению к фактической температуре наружного воздуха при соответствующей ошибке ее прогнозирования ( $\Delta t_{\text{пр}}$ ). Отсюда следуют две реальные ситуации. В случае  $[\Delta t_{\text{пр}} = t_{\text{пр}} - t_{\phi}] < 0$  (прогнозировалась более низкая температура, чем фактически наблюдалась) в сеть подается теплоноситель с более высокой температурой, т. е. возникает перерасход топлива и тепловой энергии (ситуация избыточного теплоснабжения).

Тогда

$$\Delta Q_{\text{н}} = Q_{\phi} - Q_p > 0. \quad (4)$$

Если  $[\Delta t_{\text{пр}} = t_{\text{пр}} - t_{\phi}] > 0$ , то отмечается недодача тепла — недостаточное теплоснабжение. В этом случае

$$\Delta Q_{\text{н}} = Q_{\phi} - Q_p < 0. \quad (5)$$

Последствиями такого рода ситуаций являются материальные потери в сфере производства, перерасход электроэнергии и природного газа на обогрев, потери рабочего времени и рост заболеваемости.

Величина  $\Delta Q_{\text{н}}$ , учитывающая особенности природного распределения температуры воздуха и ошибок прогнозирования, описывается нормальным распределением. Тогда средние значения недостаточного ( $Q_{\text{н}}$ ) или избыточного ( $Q_{\text{п}}$ ) расхода тепла определяются по формулам

$$Q_{\text{н}} = \int_{\Delta Q_0}^{\Delta Q_{\text{н}}^{\text{макс}}} \Delta Q_{\text{н}} \varphi(\Delta Q_{\text{н}}) d(\Delta Q_{\text{н}}), \quad (6)$$

$$Q_{\text{п}} = \int_{\Delta Q_0}^{\Delta Q_{\text{п}}^{\text{макс}}} \Delta Q_{\text{п}} \varphi(\Delta Q_{\text{п}}) d(\Delta Q_{\text{п}}), \quad (7)$$

где  $\Delta Q_0$  — погрешность контроля измерительными приборами тепла, расходуемого в отопительной сети;  $\Delta Q_{\text{п}} > 0$  и  $\Delta Q_{\text{н}} < 0$  — возможные при этом перерасход или недодача тепла;  $\varphi(\Delta Q)$  — плотность вероятности случайных отклонений расхода тепла.

На основании интегрирования с учетом плотности вероятности и ошибок прогнозирования установлены *функции тепловых потерь* (Хандожко, Вдовин, 1989):

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{п}}(\Delta t_{\text{пр}}) &= \int_{\Delta Q_0}^{\infty} \frac{\Delta Q_{\text{п}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta Q}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta Q_{\text{п}} + \Delta Q_{\text{н}}}{\sigma_{\Delta Q}}\right)^2\right] d(\Delta Q_{\text{п}}) = \\
 &= \frac{\sigma_{\Delta Q}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta Q_0 + \frac{Q_{\text{п}}^T}{t_{\text{н}} - t_{\text{п}}}\Delta t_{\text{пр}}}{\sigma_{\Delta Q}}\right)^2\right] - \\
 &\quad - \frac{Q_{\text{п}}^T}{t_{\text{н}} - t_{\text{п}}}\Delta t_{\text{пр}} \left[\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{\Delta Q_0 + \frac{Q_{\text{п}}^T}{t_{\text{н}} - t_{\text{п}}}\Delta t_{\text{пр}}}{\sigma_{\Delta Q}}\right)\right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

и

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{н}}(\Delta t_{\text{пр}}) &= \int_{-\infty}^{\Delta Q_0} \frac{\Delta Q_{\text{н}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta Q}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta Q_{\text{н}} + \Delta Q_{\text{п}}}{\sigma_{\Delta Q}}\right)^2\right] d(\Delta Q_{\text{н}}) = \\
 &= \frac{\sigma_{\Delta Q}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta Q_0 - \frac{Q_{\text{п}}^T}{t_{\text{н}} - t_{\text{п}}}\Delta t_{\text{пр}}}{\sigma_{\Delta Q}}\right)^2\right] +
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$+ \frac{Q_p^T}{t_n - t_p} \Delta t_{\text{пр}} \left[ \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{\Delta Q_0 - \frac{Q_p^T}{t_n - t_p} \Delta t_{\text{пр}}}{\sigma_{\Delta Q}} \right) \right], \quad (9)$$

где  $\sigma_{\Delta Q}$  — среднее квадратическое отклонение расхода тепла  $\Delta Q$  ( $Q_n$ ,  $Q_n$ ),  $\Phi(t)$  — функция интеграла вероятности.

При малых ошибках прогноза технологические отклонения могут вызвать как недодачу, так и перерасход тепла независимо от того, выше или ниже фактической прогнозировалась температура воздуха. При малых ошибках, меньших некоторого порогового значения ( $\Delta t_{\text{пр}} < |\Delta t|_{\text{пор}}$ ), расчеты выполняются по формулам

$$Q_n = \sigma_{\Delta Q} \tilde{Q}_n[\lambda, \Theta_{\text{пр}}] \quad (10)$$

и

$$Q_n = \sigma_{\Delta Q} \tilde{Q}_n[\lambda, \Theta_{\text{пр}}]. \quad (11)$$

Значения параметров  $\lambda$  и  $\Theta$  приведены ниже.

При больших ошибках устанавливается линейная и однозначная зависимость расхода тепла от ошибки  $\Delta t_{\text{пр}}$ . Метеорологические потери на ТЭЦ и в котельных  $s(\Delta t_{\text{пр}})$  в зависимости от ошибки прогноза  $\Delta t_{\text{пр}}$  с учетом результатов расчетов по вышеприведенным формулам определяются следующим образом:

$$s(\Delta t_{\text{пр}}) = s_n(\Delta t_{\text{пр}}) + s_n(\Delta t_{\text{пр}}). \quad (12)$$

В целях последующих расчетов и оценок приведем необходимые основные теплотехнические и метеорологические показатели для выбранных ТЭЦ Москвы:

1) тепловая мощность ( $Q_p^T$ ) для ТЭЦ-21 и ТЭЦ-22 — 4603 и 3584 Гкал/ч соответственно;

2) ошибка измерения температуры воды в тепловой системе  $\delta t_{\text{в}} = 1$  °С;



3) средняя разность температур воды  $\Delta t_b$ : прямой  $t'$  (поступающей от ТЭЦ в систему теплоснабжения) и обратной  $t''$  (возвращаемой в ТЭЦ); для Москвы  $\Delta t_b = t' - t'' = 70$  °С;

4) стоимость  $c_{\Pi}$  отпускаемого на ТЭЦ тепла; для Москвы  $c_{\Pi} = 0,12$  тыс. руб./Гкал;

5) масштаб потерь в расчете на единицу недоданной тепловой энергии ( $c_n$ ) — принято  $c_n = 3...5c_{\Pi}$ ;

6) период прогноза температуры воздуха:  $\tau = 24$  ч;

7) температура воздуха внутри отапливаемых помещений:  $t_{\Pi} = 18$  °С;

8) средняя температура воздуха за отопительный сезон ( $\bar{t}_{от}$ ); для Москвы  $\bar{t}_{от} = -3,6$  °С;

9) расчетная температура воздуха  $t_p$  (климатическая характеристика, в соответствии с которой проектируется тепловая мощность ТЭЦ); для Москвы  $t_p = -26$  °С.

Представим алгоритмическую конструкцию итогового расчета функции метеорологических потерь  $s(\Delta t_{\Pi p})$  данного теплоисточника. Для этого определим следующие параметры:

1) погрешность контроля тепла

$$\Delta Q_0 = \frac{2Q_p^T \delta t_b}{\Delta t_b}; \quad (13)$$

для ТЭЦ-22  $\Delta Q_0 = 102,4$  Гкал/ч;

2) среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_{\Delta Q} = 0,155Q_p^T \frac{t_{\Pi} - \bar{t}_{от}}{t_{\Pi} - t_p}; \quad (14)$$

для ТЭЦ-22  $\sigma_{\Delta Q} = 273$  Гкал/ч;

3) параметр  $\lambda$

$$\lambda = \frac{\Delta Q_0}{\sigma_{\Delta Q}}; \quad (15)$$

$\lambda = 0,38$ .

4) предельные значения малых ошибок прогноза среднесуточной температуры воздуха для ТЭЦ-22:  $|\Delta t|_{\text{пор}} = 10,04 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

5) относительная ошибка прогноза среднесуточной температуры воздуха  $\Theta_{\text{пр}} = 0,299\Delta t_{\text{пр}}$ ;

6) функции  $Q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{н}}$ , которые рассчитываются в зависимости от  $\lambda$  и  $\Theta$ .

Расчет функции стоимостных потерь, т. е. функции выражающей стоимостное измерение тепловых расходов, выполняется по известным формулам (Хандожко, 2005). Расчетные значения величин  $Q_{\text{п}}$ ,  $Q_{\text{н}}$  и функции стоимостных потерь  $s(\Delta t_{\text{пр}})$  при малых ошибках приведены в табл. 1.

Функция потерь может быть представлена аналитически, графически (рис. 2) или дискретно в матричной (табличной) форме.

Матрица потерь строится в том же диапазоне температуры воздуха, в котором производится регулирование отопления, т. е. в диапазоне от  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  (температура начала отопительного сезона) до расчетной температуры наружного воздуха. Таким образом, устанавливается зависимость потерь потребителя от ошибок прогнозов. Если мощность ТЭЦ существенно не меняется, эта зависимость обычно используется в течении ряда лет.

На основании полученной функции представляется возможным разработать матрицу потерь при условии сохранения выбранной ширины градации температуры воздуха и ее средних значений. Содержание элементов матрицы потерь будет определяться

Таблица 1

Результаты расчета тепловых и стоимостных потерь (тыс. руб./сут) для ТЭЦ-22 Москвы при малых ошибках

|                           | $\Delta t_{\text{пр}} < 0$ |        |       | $\Delta t_{\text{пр}} = 0$ | $\Delta t_{\text{пр}} > 0$ |        |        |
|---------------------------|----------------------------|--------|-------|----------------------------|----------------------------|--------|--------|
|                           | -9                         | -6     | -3    |                            | 3                          | 6      | 9      |
| $Q_{\text{п}}$            | 733,3                      | 492,2  | 265,1 | 99,8                       | 22,9                       | 6      | 0,8    |
| $Q_{\text{н}}$            | 0,8                        | 6,0    | 22,9  | 99,8                       | 265,1                      | 492,2  | 733,3  |
| $s(\Delta t_{\text{пр}})$ | 2119,0                     | 1469,0 | 961,3 | 1149,8                     | 2356,2                     | 4270,2 | 6338,2 |

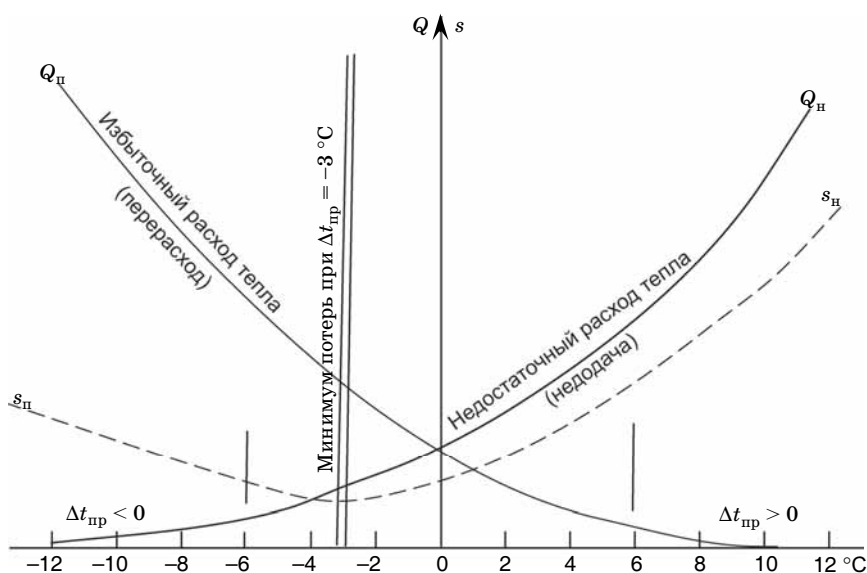


Рис. 2. Функции тепловых и стоимостных потерь.

величиной ошибки  $\Delta t_{пр}$ . По главной диагонали выстраиваются все значения  $s(\Delta t_{пр})$  при  $\Delta t_{пр} = 0$ . Остальные смежные диагонали представляют значения  $s(\Delta t_{пр})$ , отвечающие соответствующим ошибкам. В табл. 2 приведена матрица потерь для ТЭЦ -22 Москвы.

Каждый потребитель вправе выбрать тот природный информационный ресурс, который, как ему представляется, может быть практически полезным. Однако реальные изменения погодных условий показывают, что стратегия ориентации потребителя на исходную фактическую погоду сопряжена со значительными метеорологическими рисками и может стать причиной как избыточного, так и недостаточного теплоснабжения со всеми вытекающими социальными и экономическими последствиями.

Возникает естественная потребность установить, насколько методические прогнозы температуры воздуха как научная продукция предпочтительнее и экономически результативнее инер-

Таблица 2

Матрица потерь (тыс. руб./прогноз) для ТЭЦ-22 (Москва)

| $\Phi_i$ — фактически<br>наблюдалось, °С | $d(\Pi_j)$ — решение потребителя ориентироваться на данный текст прогноза |           |           |         |         |          |          |          |          |
|--|---|-----------|-----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
|  | -18...-16   | -15...-13 | -12...-10 | -9...-7 | -6...-4 | -3...-1  | 0...2    | 3...5    | 6...8    |
| -18...-16                                | 1149,83   | 2356,21   | 4270,24   | 6338,21 | 8445,2  | 10 556,5 |          |          |          |
| -15...-13                                | 961,34  | 1149,83   | 2356,21   | 4270,24 | 6338,21 | 8445,2   | 10 556,5 |          |          |
| -12...-10                                | 1469,49   | 961,34    | 1149,83   | 2356,21 | 4270,24 | 6338,21  | 8445,2   | 10 556,5 |          |
| -9...-7                                  | 2119,02   | 1469,49   | 961,34    | 1149,83 | 2356,21 | 4270,24  | 6338,21  | 8445,2   | 10 556,5 |
| -6...-4                                  | 2815,07   | 2119,02   | 1469,49   | 961,34  | 1149,83 | 2356,21  | 4270,24  | 6338,21  | 8445,2   |
| -3...-1                                  | 3518,84   | 2815,07   | 2119,02   | 1469,49 | 961,34  | 1149,83  | 2356,21  | 4270,24  | 6338,21  |
| 0...2                                    |   | 3518,84   | 2815,07   | 2119,02 | 1469,49 | 961,34   | 1149,83  | 2356,21  | 4270,24  |
| 3...5                                    |   |           | 3518,84   | 2815,07 | 2119,02 | 1469,49  | 961,34   | 1149,83  | 2356,21  |
| 6...8                                    |   |           |           | 3518,84 | 2815,07 | 2119,02  | 1469,49  | 961,34   | 1149,83  |

ционных прогнозов. Экономический эффект использования прогнозов определяется следующим образом:

$$\Theta = \beta N [(\bar{R}_{ин} - \bar{R}_м) - \mathfrak{Z}_{ин}], \quad (16)$$

где  $\beta$  — коэффициент долевого участия системы Росгидромета в получении экономического эффекта при использовании прогнозов,  $\beta = 0,7$ ;  $N$  — общее число прогнозов;  $\bar{R}_м$  — средние потери при использовании методических прогнозов;  $\bar{R}_{ин}$  — средние потери при использовании инерционных прогнозов;  $\mathfrak{Z}_{ин}$  — стоимость единицы прогностической информации.

Оценка средних потерь устанавливается на основании матрицы систематических потерь, элементы которой определяются следующим образом:

$$\bar{R}_{kj} = \sum_{k=1}^n s_{ki} q_{ij}, \quad (17)$$

где  $s_{ki}$  — элементы матрицы потерь  $\|s_{ij}\|$ , отвечающие  $k$ -му решению (действию потребителя) в ожидании температуры воздуха  $\Phi_j$ .

Матрица систематических потерь, установленная на основе методических прогнозов, выполняет роль погодохозяйственного регламента выбора диспетчером оптимального решения относительно задания режима работы теплоисточника. Расчет  $\bar{R}_{kj}$  производится как для методических, так и для инерционных прогнозов. На этом основании определяются средние потери при стратегии доверия прогнозам, т. е. при  $\Pi_j$  выбирается решение  $d_k$ :

$$\bar{R}_м = \sum_{j=1}^m p_{0j} \bar{R}_{k=j}(\Pi_j), \quad (18)$$

где  $p_{0j} = \frac{n_{0j}}{N}$  — повторяемость текстов прогноза (градаций)  $\Pi_j$ ;  $\bar{R}_{k=j}(\Pi_j)$  — элементы матрицы систематических потерь — сред-

ние потери при тексте прогноза  $\Pi_j$  и  $k$ -м решении (действии) диспетчера ТЭЦ, ориентированном на выбранную им градацию температуры воздуха. Индекс  $k = j$  приходится на главную диагональ матрицы, что отвечает стратегии доверия прогнозам.

Устанавливаются средние потери, если потребитель выбрал инерционные прогнозы — исходные значения температуры воздуха:

$$\bar{R}_{ин} = \sum_{j=1}^m p_{0j}^{ин} \bar{R}_{k=j}(\Pi_j). \quad (19)$$

При оптимальной стратегии, обеспечивающей минимум тепловых и топливных потерь, находим

$$\bar{R}_{мо} = \sum_{j=1}^m p_{0j} \min \bar{R}_{kj}(\Pi_j). \quad (20)$$

Наряду с экономическим эффектом обязательным условием оценки является определение экономической эффективности, отражающей доход потребителя на единицу стоимости прогностической информации:

$$P = \frac{\Theta_m}{N \mathcal{Z}_{ин}}, \quad (21)$$

где  $N$  — общее число прогнозов,  $\mathcal{Z}_{ин}$  — стоимость единицы прогностической информации.

За выбранный период с 2003 по 2008 г. выполнены расчеты средних потерь и определены показатели экономической полезности прогнозов температуры воздуха для теплоэнергетики Москвы. Результаты расчетов по ТЭЦ-22 приведены в табл. 3.

Из таблицы видно, что за пятилетний период экономический эффект использования прогнозов на ТЭЦ-22 составил 275 млн. рублей. В отдельные годы экономическая полезность прогнозов заметно меняется. Экономическая эффективность на 1 рубль затрат на прогнозы достигает примерно 488 рублей при стратегии доверия прогнозам и около 519 рублей при оптимальной стратегии.

Таблица 3

**Оценка показателей экономической полезности прогнозов  
среднесуточной температуры воздуха для ТЭЦ-22 (Москва)**

| Отопительный период | Экономический эффект и эффективность |                           |                |                 |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------|-----------------|
|                     | Э <sub>м</sub> тыс. руб.             | Э <sub>мо</sub> тыс. руб. | P <sub>м</sub> | P <sub>мо</sub> |
| 2003—2004           | 34 063,0                             | 60 619,9                  | 160,6          | 285,9           |
| 2004—2005           | 56 734,8                             | 81 068,5                  | 268,8          | 384,2           |
| 2005—2006           | 65 334,3                             | 85 998,6                  | 309,6          | 407,5           |
| 2006—2007           | 102 885,8                            | 109 459,7                 | 487,6          | 518,7           |
| 2007—2008           | 16 515,6                             | 65 889,8                  | 78,6           | 313,7           |
| Итого               | 275 533,5                            | 403 036,5                 | —              | —               |
| Среднее             | 55 106,7                             | 80 607,3                  | 261,04         | 382,0           |

Следует заметить, что правильный прогноз резких изменений температуры воздуха позволяет избежать крупных потерь перерасхода или недодачи тепла. Матрицы систематических потерь позволяют рассчитать средние потери за отопительный период при различных стратегиях. Средние потери рассматриваются в качестве критерия оптимальности выбора лучшего прогностического ресурса. Экономический эффект использования прогнозов выступает в виде сэкономленных материальных ресурсов, а экономическая эффективность — как достижение результата на единицу расходов поставщика информации. Исследование экономической полезности прогностической информации для системы теплоэнергетики Москвы является частью целевой Программы энерго-и ресурсосбережения в стране.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бедрицкий А. И., Хандожко Л. А., 2001. Экономическая полезность гидрометеорологического обеспечения. — Бюлл. ВМО, т. 50, № 3, с. 266—271.
- Исаев А. А., Гутников В. А., Шерстюков Б. Г., 2002. Научно-прикладной справочник по климату Москвы. Сер. 2. Ч. 3. Данные за отдельные годы. Вып. 1. Температура воздуха, количество осадков (по месяцам и за год), характеристики отопительного периода (1879—2000 гг.).— М.: Изд-во МГУ. — 155 с.

Заварина З. В., 1976. Строительная климатология. — Л.: Гидрометиздат. — 312 с.

Климатические изменения: взгляд из России, 2003. — М.: ТЕКС. — 416 с.

Кобышева Н. В., Ключева М. В., Александрова А. А., Булыгина О. Н., 2004. Климатические характеристики отопительного периода в субъектах Российской Федерации в настоящем и будущем. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 46—52.

Кобышева Н. В., 2005. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. — СПб: Гидрометеиздат. — 319 с.

Липовских В. М., 1999. Теплофикация Москвы. — В сб.: Инф. бюлл. «Теплоэнергоэффективные технологии». — СПб: «АЦТЭЭТ», № 2, с. 33—40.

Международная конференция, 2003. «Энергоэффективность и Киотский протокол». — Омск: Изд-во Ом ГТУ. — 159 с.

Послание Президента России к Федеральному собранию от 05.11.2008.

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.08.2003 № 1234-р «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года».

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

Хандожко Л. А., Вдовин В. Б., 1989. Функции метеорологических потерь теплоэлектростанций. — Труды ГГО, вып. 528, с. 49—57.

Хандожко Л. А., 2006. Методические основы энерго- и ресурсосбережения в теплоэнергетике России. — Метеоспектр, № 2, с. 93—103.



УДК 551.584

**ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ И ПРИНЦИПЫ УЧЕТА  
МЕЗО- И МИКРОКЛИМАТА ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ  
ОЦЕНКАХ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ  
СЕКТОРОВ ЭКОНОМИКИ**

*Г. Б. Пигольцина*

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

Поступила в редакцию 21.05.2009, после доработки 24.09.2009

**Введение**

В настоящее время при постоянно растущем антропогенном давлении на экосистемы процесс интенсификации большинства отраслей экономики, особенно климатозависимых, неразрывно связан с рациональным использованием природно-климатических ресурсов, которое сопровождается резким возрастанием значения детальной мезо- и микроклиматической информации как средства принятия оптимальных хозяйственных решений. Особенно велика роль учета мезо- и микроклимата в регионах со сложными условиями рельефа, где на небольших расстояниях могут наблюдаться значительные изменения климатических показателей.

В ГГО разработаны теоретические основы, методы и критерии мезо- и микроклиматической оценки, которые дают возможность оценить климатические условия с любой детализацией, вплоть до отдельных сельскохозяйственных полей, урбанизированных и рекреационных территорий, биогеоценозов и т. д. (Гольцберг, 1961; Мищенко, 1984; Романова, 1977; Береснева, 2006; Адаменко, 1979; Горышина, 1979; Пигольцина, 2003; Микроклимат холмистого рельефа..., 1962; Микроклимат СССР, 1967 и др.).

Выполненные в ГГО исследования показывают, что изменение характера подстилающей поверхности в пределах единой климатической зоны, даже сравнительно однородной по макроклиматическому фону, вызывает значительные различия метео-

рологического режима в приземном слое воздуха и верхних горизонтах почвы. Учет этой мезоклиматической изменчивости существенно уточняет зональные показатели климата.

Формирование микроклиматических вариаций происходит на фоне определенных мезоклиматов и создает на небольших расстояниях значительные различия климатических ресурсов. Микроклиматическая изменчивость метеорологических величин может в несколько раз превышать широтные и высотные климатические градиенты.

Детальный анализ пространственно-временных закономерностей мезо- и микроклиматической изменчивости основных элементов климата на строго количественной основе применительно к определенным территориям и конкретным отраслям экономики позволяет не только выявить и оценить реально существующие климатические ресурсы, но и обосновать пути их наилучшего использования, установить причины нарушения экологического равновесия, выделить зоны экологического оптимума и риска, определить способы оптимизации локальных экологических условий.

#### **Обоснование необходимости учета мезо- и микроклимата в различных секторах экономики**

Из всех отраслей экономики сельскохозяйственное производство и градостроительство в наибольшей степени зависят от климатических условий.

В *сельскохозяйственном производстве* влияние климатических факторов на уровень урожайности сельскохозяйственных культур проявляется, в частности, в непостоянстве урожая. Большая пространственная изменчивость урожайности, которая часто наблюдается в пределах одного агроклиматического района даже при высоком уровне агротехники, обусловлена мезо- и микроклиматическими особенностями территории.

В пределах области, района и даже отдельного хозяйства, как правило, наблюдаются существенные изменения метеорологических величин, их комплексов, условий тепло- и влагообеспеченности. Эти мезо- и микроклиматические изменения, обусловленные неоднородностями подстилающей поверхности (рельефом местно-

сти, влиянием водоемов, почвенными разностями и т. п.), могут быть весьма значительными даже в пределах сравнительно однородной по условиям подстилающей поверхности территории. Например, мезоклиматическое районирование Ленинградской области, выполненное как по отдельным климатическим показателям, так и по их комплексу (Гольцберг, 1977; Пигольцина 1987; Романова, 1989), показало значительную дифференциацию агроклиматических ресурсов территории области по сравнению с агроклиматическим районированием, представленным в справочнике «Агроклиматические ресурсы Ленинградской области» (1971).

Мезоклиматическая изменчивость по территории области таких показателей теплообеспеченности, как сумма температур за безморозный период и его продолжительность, соответствует в зональном аспекте изменению суммы температур почти на  $10^\circ$  широты — от 1000 до 2050  $^\circ\text{C}$ , как от Архангельска до Нижнего Новгорода, а продолжительность безморозного периода — почти на  $20^\circ$  широты — от 70 до 150 дней (70 дней наблюдается лишь на крайнем севере Европейской части России, а 150 дней — на широте Воронежа и Саратова).

Изменение показателей радиационного режима (фотосинтетически активной радиации за безморозный период) в пределах области составляет 400 МДж/м<sup>2</sup>, что в 10 раз превышает широтный градиент. Значения интегрального показателя увлажнения ( $E/E_0$ ) изменяются от 1,0 до 0,7. В зональных аспектах этот диапазон соответствует изменению условий увлажнения почвы от избыточно влажных до слабо засушливых.

Таким образом, в пределах Ленинградской области имеют место существенные различия комплекса агроклиматических показателей при переходе от одного мезоклиматического района к другому.

Кроме того, в пределах каждого мезорайона наблюдается микроклиматическая изменчивость как отдельных агроклиматических показателей, так и их комплексов. Диапазон этих изменений чрезвычайно велик. В зависимости от местоположения в разных мезорайонах Ленинградской области значения сумм температур за безморозный период варьируют от 700 до 2150  $^\circ\text{C}$ , продолжительность безморозного периода колеблется от 45 до 160 дней, что в зональном аспекте соизмеримо с изменением дан-

ных величин на  $15^\circ$  широты. Во столько же раз превышает широтный градиент микроклиматическая изменчивость фотосинтетически активной радиации (ФАР) за безморозный период (от 600 до 1200 МДж/м<sup>2</sup>). В зависимости от микроклиматических особенностей условия увлажнения в пределах области варьируют от избыточно влажных в течение всего вегетационного периода до очень засушливых, что при зональном распределении соответствует изменению этого показателя от лесотундры до полупустыни.

Очевидно, что при такой большой пространственной изменчивости агроклиматических показателей без учета мезо- и микроклиматической информации невозможно достигнуть высокого уровня интенсификации сельского хозяйства.

В настоящее время построена численная модель, позволяющая количественно оценить зависимость урожайности от мезо- и микроклиматических факторов и определить реальные возможности повышения продуктивности агроэкосистем (Пигольцина, 2003). Разработанный метод позволяет выявить пространственную изменчивость продуктивности агроценозов, определить преимущество того или иного района и местоположения в формировании урожая конкретных культур и дает возможность объективного выделения зон экологического оптимума и риска для их возделывания.

На рис. 1 в качестве примера приведено районирование Ленинградской области по климатически обеспеченной урожайности (КОУ) картофеля (Пигольцина, 2003).

В зависимости от мезоклиматической изменчивости агресурсов КОУ в пределах области изменяется в 1,5 раза. Наибольшая величина урожая отмечается в районе 1. Это самый благоприятный по условиям тепло- и влагообеспеченности район, который может быть оценен как зона экологического оптимума. В районе 2 обеспеченность мезоклиматических условий возделывания картофеля близка к оптимальной и производственный риск (относительно максимального урожая) составляет всего 6—8 %. В районе 3 обеспеченность мезоклиматическими ресурсами является удовлетворительной, производственный риск составляет 12—14 %. Районы 4 и 5 — самые неблагоприятные для выращивания картофеля, производственный риск здесь превышает 30 %, и для получения высоких урожаев в этих районах необходимо

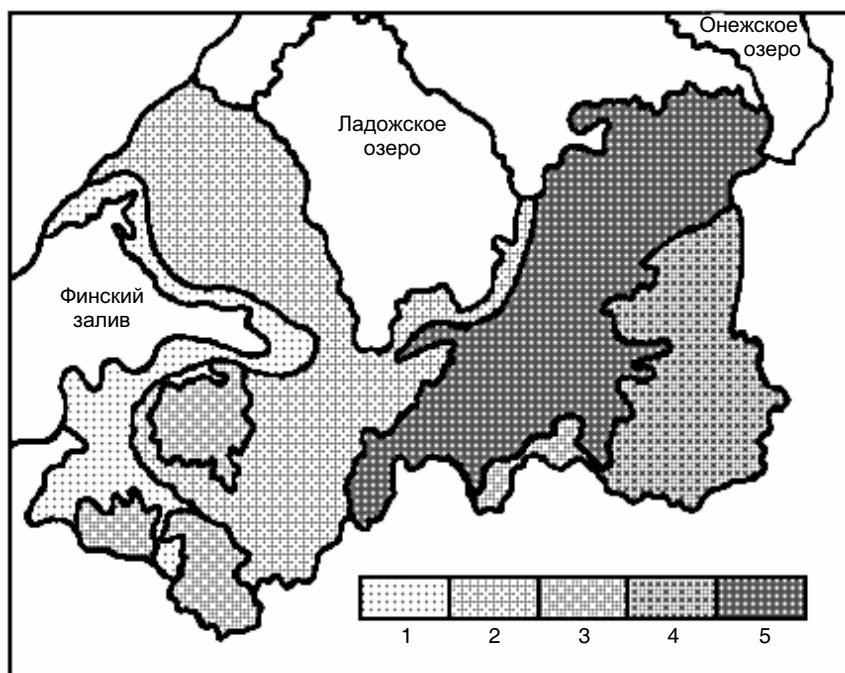


Рис. 1. Районирование территории Ленинградской области по климатически обеспеченной урожайности (КОУ) картофеля в зависимости от особенностей мезоклимата.

| Район .....    | 1         | 2         | 3         | 4         | 5     |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| КОУ, ц/га..... | 360 — 340 | 330 — 320 | 310 — 300 | 250 — 240 | < 240 |

проводить мероприятия, направленные на улучшение условий тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода. Эту территорию можно отнести к зоне экологического риска.

В каждом мезорайоне, как в зоне экологического оптимума, так и в зоне экологического риска, могут встречаться оптимальные и неблагоприятные по микроклимату местоположения, называемые в литературе агроэкологическими нишами. В разных мезоклиматических районах в зависимости от их тепловых ресурсов и условий увлажнения ниши агроэкологического оптимума и риска будут различны. Например, в мезорайоне 3 (см. рис. 1), ха-

рактизирующимся высоким теплоэнергетическим потенциалом и дефицитом влаги, в оптимальных условиях будут находиться поля, расположенные у подножия склонов, в самых неблагоприятных условиях — поля в верхних частях южных склонов. В мезорайоне 5 с низким уровнем ФАР, относительно коротким безморозным периодом и повышенным увлажнением, наоборот, подножия склонов будут нишей агроэкологического риска, а нишей оптимума — верхние части склонов.

Выбором оптимальных местоположений можно минимизировать неблагоприятные мезоклиматические условия. Так, в зоне экологического риска (район 5) в оптимальных агроэкологических нишах можно получать такой же урожай, как в благоприятных местоположениях самого обеспеченного ресурсами тепла и влаги района 1, и на 20 % больше, чем в районе 3.

Таким образом, учет мезо- и микроклиматических особенностей конкретных земельных угодий является значительным резервом повышения урожайности, не требующим дополнительных затрат. Однако уровень и качество урожая зависят не только от оптимизации размещения сельскохозяйственных культур, но и в значительной степени от своевременной реализации комплекса агротехнических мероприятий. Изменение климатических показателей в мезо- и микромасштабе, как было показано выше, вызывает большие различия гидротермических условий на соседних сельскохозяйственных полях. Поэтому планирование и практическая реализация технологических решений достигнут наибольшей эффективности только в том случае, если они будут проводиться с учетом мезо- и микроклиматических особенностей территории и изменения этих особенностей под влиянием погодных условий отдельных лет.

Несоблюдения корректировки сроков проведения агротехнических мероприятий, рассчитанной для каждого поля с учетом микроклимата, может привести к значительным потерям урожая. Например, в пределах одного хозяйства Ленинградской области ущерб от неучета микроклиматической информации, оцениваемый отношением потерь урожая к реально возможному в конкретный вегетационный период, составил 70 % (Горышина, 1981). Это говорит о том, что одним из путей повышения уровня урожая и его стабильности является корректировка сроков про-

ведения агротехнических мероприятий не только на основании сложившихся и ожидаемых региональных метеорологических условий, но и в зависимости от изменения этих условий под влиянием микроклиматических особенностей отдельных сельскохозяйственных полей.

Детальная оценка природно-климатических ресурсов конкретных территорий также очень важна при решении экологических проблем *строительного проектирования*. Город как урбанизированная система создает свой мезо- и микроклимат, отличный от естественного природного. В зависимости от градостроительных решений урбанизированный микроклимат может отличаться от естественного как в сторону ухудшения микро- и биоклиматических условий, так и в сторону их улучшения.

Микроклиматическая оценка городских территорий основывается на исследованиях закономерностей формирования микроклимата в конкретных природных условиях и прогнозировании его изменений под влиянием урбанизации. Результаты таких исследований позволяют определить направления архитектурно-планировочных решений, способствующие оптимизации естественного микро- и биоклимата, а следовательно, и экологической обстановки в пределах городских структур.

При оценке природных особенностей, формирующих микро- и биоклимат в урбанизированных регионах, учитываются закономерности воздействия городской системы на экологическую обстановку в разных климатических зонах и при разных типах неоднородностей подстилающей поверхности. На основании анализа и расчета определяющих параметров климата в разные сезоны года с учетом природных условий и ландшафтных особенностей территорий выполняется пространственное зонирование районов существующей и проектируемой застройки конкретных городов и разрабатываются предложения по территориальному развитию города с позиций комфортности микро- и биоклимата и с оценкой потенциальных условий локального загрязнения воздуха.

В ГГО такие исследования проводились для ряда городов, расположенных в разных географических районах России. В качестве примера приведем результаты микробиоклиматического зонирования г. Читы, выполненного в рамках хоздоговорной работы в лаборатории микроклимата под руководством Е. Н. Романовой.

Наиболее негативной общей чертой климата рассматриваемой территории является высокое потенциальное загрязнение, вызываемое котловинным эффектом района расположения города в зоне действия мощного сибирского антициклона. Однако выраженная неоднородность подстилающей поверхности, к которой относятся разновидности форм рельефа, водные объекты (реки и озера), зеленые массивы и аллеи, обуславливает формирование разных микроклиматических условий и различия в степени потенциальной экологической опасности.

Выполненная количественная оценка микроклиматической изменчивости комплекса стандартных и специализированных климатических показателей позволила на территории г. Читы выделить семь типов микроклимата и провести их ранжирование по степени комфортности в зависимости от микроклиматических особенностей и потенциальных возможностей рассеяния примесей по нарастающей шкале: наиболее комфортен тип микро- и биоклимата под номером 1, а относительно лучшие потенциальные условия рассеяния примесей характерны для ранга А (табл. 1).

Таблица 1

**Ранжирование типов микроклимата по степени их комфортности и потенциальным условиям рассеяния примесей (РП) на территории г. Читы**

| Номер типа микроклимата | Тип микроклимата                            | Ранг типа микроклимата  |                              |
|-------------------------|---|-------------------------|------------------------------|
|                         |   | по степени комфортности | по потенциальным условиям РП |
| 1                       | Возвышенные участки и верхние части склонов | V                       | A                            |
| 2                       | Средние и нижние части склонов              | II                      | B                            |
| 3                       | Пониженные участки                          | VI                      | E                            |
| 4                       | Котловины                                   | VII                     | Ж                            |
| 5                       | Поймы                                       | IV                      | Д                            |
| 6                       | Надпойменные террасы                        | I                       | Б                            |
| 7                       | Ровные участки                              | III                     | Г                            |



Из табл. 1 следует, что наибольшая степень комфортности микроклимата не всегда совпадает с лучшими условиями рассеяния атмосферных примесей. Наиболее ярко это несоответствие проявляется в случае типа 1, который характеризуется лучшими условиями рассеяния (А) и невысокой степенью комфортности микроклимата (V).

На основании таких исследований разрабатываются рекомендации по оптимальному территориальному развитию города с позиций комфортности микро- и биоклимата и минимизации потенциала локальных загрязнений воздуха.

Не менее важен учет мезо- и микроклимата при выборе районов и площадок под *размещение промышленных комплексов*, особенно повышенной вредности. В последние годы этот вопрос стал чрезвычайно актуальным в связи с интенсивным освоением восточных районов Азии под инвестиционные проекты, что привело к значительному увеличению запросов, касающихся микроклиматического обоснования размещения проектируемых промышленных объектов и жилых массивов.

Острая необходимость в оценке микроклиматических условий конкретных территорий, предназначенных для хозяйственного освоения, продиктована сложными физико-географическими условиями данного региона. Очень сложная по геоморфологическому строению территория Восточной Сибири с многочисленными различно ориентированными горными хребтами, перевалами, склонами, глубоко врезанными долинами рек и ручьев существенно деформирует общий воздушный поток, способствует возникновению местных циркуляций, вносит коррективы в интенсивность инверсионных процессов. Все это приводит к выраженной неоднородности метеорологического режима в приземном слое воздуха, наличию больших микроклиматических различий на небольших расстояниях, усложняет картину распространения промышленных выбросов, загрязняющих приземную атмосферу. В таких условиях микроклиматические, биоклиматические и санитарно-гигиенические условия меняются существенно в пространстве и неправильный выбор места строительной площадки приводит к значительному ухудшению экологической обстановки и условий проживания человека.

В ГГО исследования данного направления проводились для ряда районов указанного региона. Например, была выполнена оценка мезо- и микроклиматических условий Нижнего Приангарья для целей промышленного освоения региона и дана сравнительная оценка степени оптимальности местоположения площадок предполагаемого размещения производственных комплексов и населенных пунктов в районе Богучанского промышленного узла.

Также была выполнена микроклиматическая оценка площадок проектируемого хозяйственного освоения Уссурийского городского округа (Приморский край), т. е. территории, расположенной в совершенно иных климатических условиях по сравнению с районом Нижнего Приангарья.

В каждом случае на основе проведенного анализа климатических, мезо- и микроклиматических условий района изысканий дается подробный микроклиматический анализ площадок возможного хозяйственного освоения с оценкой их пригодности под размещение предприятий разной степени вредности.

В качестве примера (с целью составить формальное представление об итогах таких заключений) приведем краткие выводы по микроклиматической оценке Уссурийского городского округа. Обозначенные в выводах номера контуров (участков) соответствуют номерам контуров Генерального плана хозяйственного освоения данной территории, однако карту плана в формате настоящей работы привести невозможно, поскольку при сильном уменьшении масштаба контуры будут неразличимы.

Краткие выводы (практические рекомендации) в данном случае сводятся к следующему:

- 1) ЦБК целесообразно разместить в контуре 4 или 8;
- 2) масложирокомбинат вынести в контур 1 или 8, но при этом не размещать ЦБК и комбинат в одном контуре;
- 3) свалку перенести в район, обозначенный в проекте;
- 4) ТЭЦ можно разместить в районе картонного завода (контур 10);
- 5) завод «Гормолоко» перенести в контур 5а (или в контур 5, что хуже);
- 6) Локомотиворемонтный завод перенести в контуры 7 или 9;
- 7) в промзоне расположения «ООО Цзи-Синь» можно размещать предприятия только низкого класса вредности;

8) под предприятия высокого класса вредности лучше всего подходит контур 1, затем — контур 8, затем — контур 4 (ранжирование показывает степень нарастания экологической напряженности).

Разумеется, в рекомендациях, предоставляемых потребителю, дается подробное научное обоснование возможных вариантов размещения проектируемых объектов.

Практика показала, что после получения заказчиком таких рекомендаций, учитывающих как негативные, так и благоприятные для размещения различных строительных объектов микроклиматические условия, проектный план, как правило, подвергается весьма существенным изменениям.

Другой аспект этой проблемы касается микроклиматической оценки влияния уже действующих промышленных предприятий на окружающую территорию. В существующих нормативных документах даются рекомендации по расчету ряда параметров, характеризующих степень загрязнения окружающей среды. Однако методики их расчета позволяют получить только очень общую оценку загрязнения и не учитывают изменение направления адвективных процессов под влиянием различных местных условий в разные сезоны года. Это приводит к формальным и часто неверным выводам об экологическом состоянии конкретных районов.

Например, для горнометаллургического комбината (ГМК) «Печенганикель», расположенного на крайнем северо-западе России в сложных условиях рельефа, было выполнено микроклиматическое исследование по воздействию обогатительной фабрики и хвостохранилища на город Заполярный, в результате которого представлена количественная оценка пылепереносов с хвостохранилища на город и разработаны рекомендации по корректировке методики расчета нормированных выбросов ГМК. В итоге расчеты выбросов, выполненные с учетом влияния микроклиматических особенностей территории на условия распространения загрязняющих веществ, послужили основанием для уменьшения штрафных санкций.

Использование микроклиматической информации также необходимо для решения локальных экологических проблем разно-

го характера, например связанных с загрязнением окружающей среды нефтяными углеводородами. В свете активизации в последнее время технологических процессов по добыче и транспортировке техногенных углеводородов особенно важным становится вопрос разработки методов количественной оценки, пространственного отображения и создания картографических моделей геохимической устойчивости ландшафтов к загрязнению нефтяными углеводородами.

Для решения этих задач разработаны новые методологические подходы с учетом микроклимата (Огурцов, 2007), которые были апробированы при оценке устойчивости почвенного покрова к нефтяному загрязнению на участке площадью около 5 км<sup>2</sup> в районе Инзырейского месторождения в Ненецком автономном округе. Для оценки потенциальной способности почвенного покрова к самоочищению было использовано десять критериев, в том числе два климатических — сумма температур поверхности почвы за период с температурой воздуха выше 10 °С и продолжительность безморозного периода. Данные климатические показатели характеризуют термические условия среды, влияющие на скорость разложения углеводородов, и в конечном счете на самоочищающую способность почвенного покрова.

Для детальной характеристики пространственного распределения указанных климатических показателей были выполнены соответствующие микроклиматические исследования и построены микроклиматические карты, которые выявили значительные изменения термических условий в пределах рассматриваемой территории (рис. 2 и 3).

Полученные микроклиматические различия позволили более детально оценить потенциальные возможности устойчивости конкретных земельных участков к загрязнению нефтяными углеводородами.

На рис. 4 представлена интегральная оценка устойчивости почвенного покрова исследуемой территории к загрязнению нефтяными углеводородами, полученная по информационному сценарию, при котором приоритет (значимость весовых коэффициентов) отдавался микроклиматической информации.

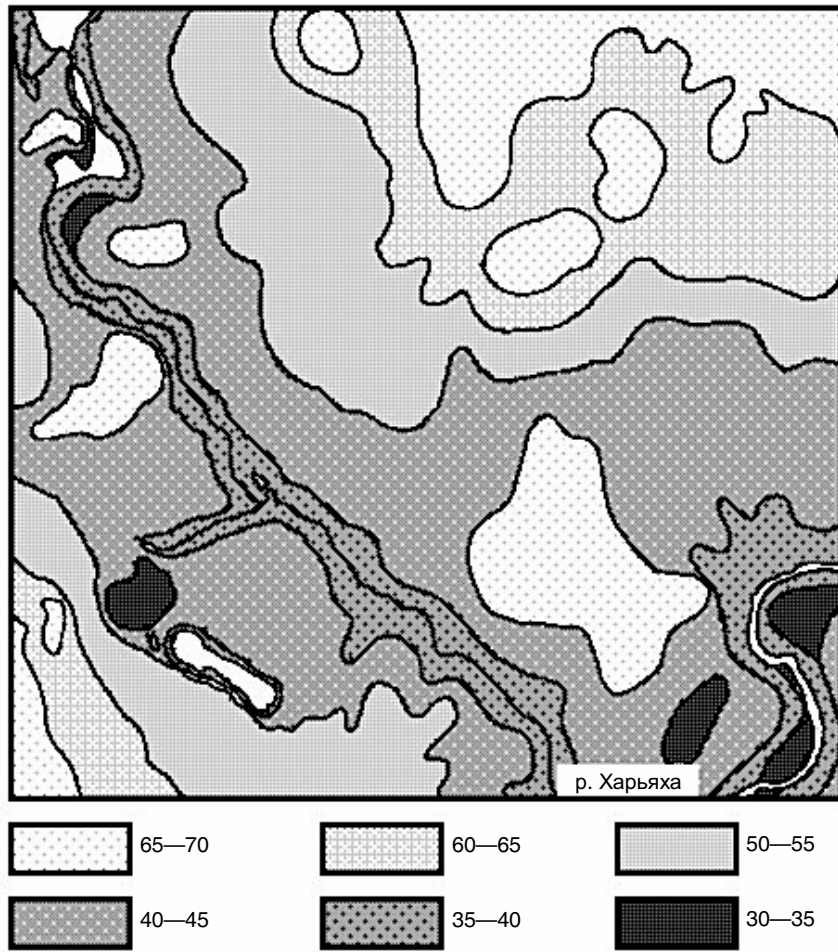


Рис. 2. Микроклиматическая карта продолжительности безморозного периода (число дней) для участка Инзырейского месторождения.

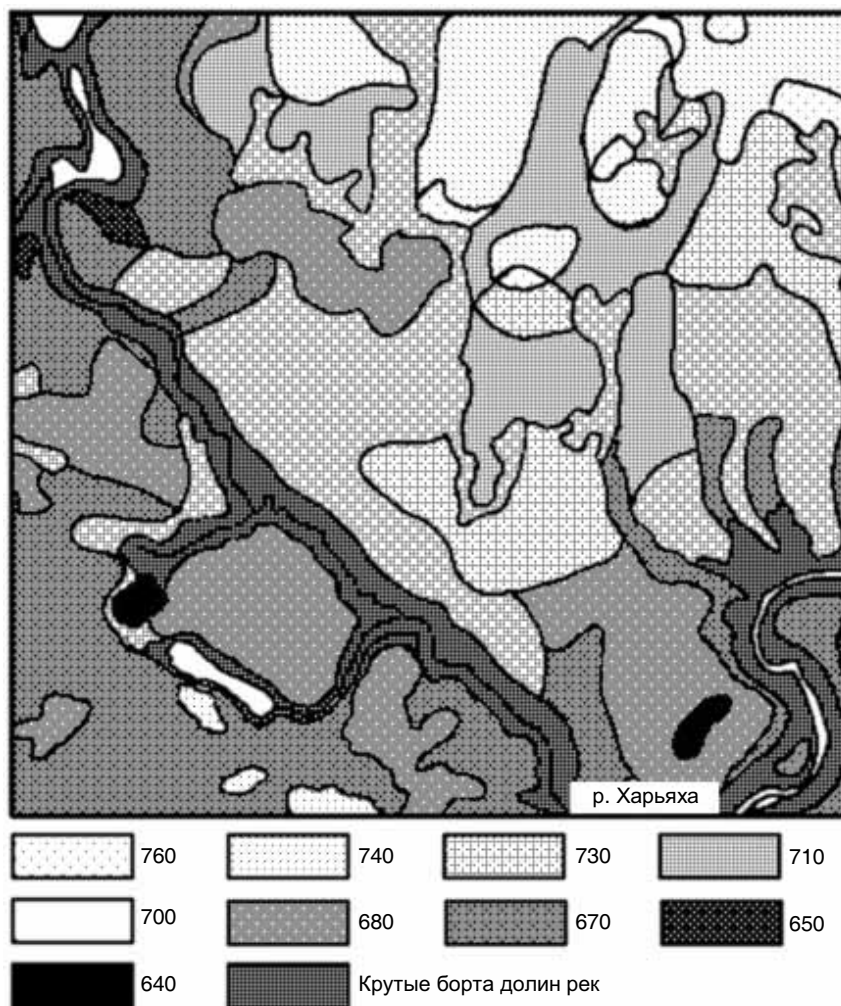


Рис. 3. Микроклиматическая карта сумм температур поверхности почвы (°C) за период с температурой воздуха выше 10 °C для участка Инзырейского месторождения.

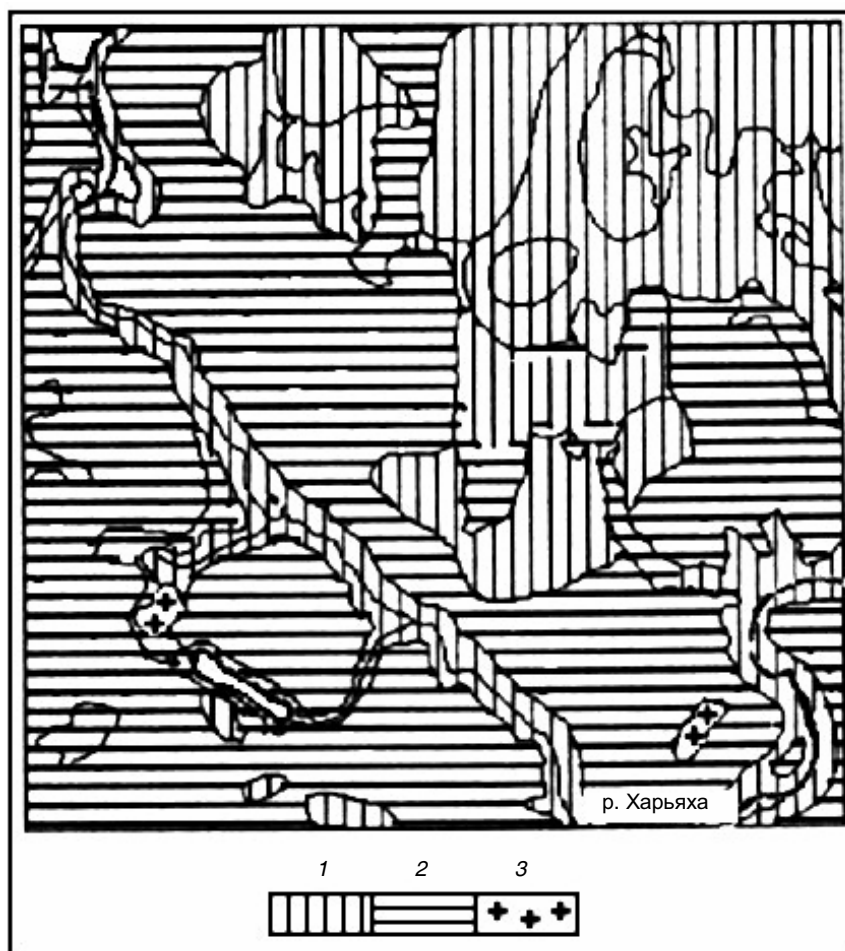


Рис. 4. Интегральная оценка устойчивости почвенного покрова участка Инзырейского месторождения к загрязнению нефтяными углеводородами.  
Усл. обозначения 1—3 см. табл. 2.

По степени устойчивости почв к загрязнению нефтяными углеводородами на данной территории выделяются три градации с пониженными значениями интегрального индекса устойчивости (табл. 2). Отсутствие участков с более высокими значениями индекса в значительной мере определяется низким уровнем термических ресурсов северного региона.

Таблица 2

**Интегральная оценка устойчивости почвенного покрова  
к загрязнению нефтяными углеводородами**

| Номер района<br>на рис. 4 | Интегральный<br>индекс | Характеристика устойчивости почв |
|---------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Нет                       | 0,8—1,0                | Относительно устойчивые          |
| Нет                       | 0,6—0,8                | Слабо устойчивые                 |
| 1                         | 0,4—0,6                | Относительно неустойчивые        |
| 2                         | 0,2—0,4                | Неустойчивые                     |
| 3                         | 0,0—0,2                | Наиболее неустойчивые            |

Расчеты при других информационных сценариях также показали, что почвы рассматриваемого участка в целом неустойчивы к нефтяному загрязнению.

К важнейшим общегосударственным задачам относится и развитие *рекреационной деятельности*. Выбор районов и планировочная организация курортно-санаторных и спортивных зон требуют, в первую очередь, оценки мезо- и микроклиматических особенностей территории. Учет этих особенностей позволяет определить профилизацию курортов, выявить рекреационную ценность конкретных участков, степень их биоклиматической комфортности.

В санаторно-курортном лечении микроклиматическая информация используется для разработки мероприятий по метеопрофилактике различных видов заболеваний, при проведении и дозировании климатотерапевтических процедур.

При освоении территорий под горнолыжные курорты и функционировании последних учет микроклиматических особенно-



стей имеет особо важное значение. Горнолыжные комплексы располагаются в сложных условиях рельефа, где на небольших расстояниях имеют место значительные изменения параметров климата под влиянием изменения абсолютной высоты над уровнем моря и форм рельефа. С помощью микроклиматических исследований можно выполнить детальную оценку пространственной изменчивости таких важных для горно-спортивных трасс характеристик, как, например, продолжительность залегания и высота снежного покрова, скорость и направление ветра. Исследования данного направления в настоящее время выполняются в ГГО для составления микроклиматического описания и районирования территории проведения зимних Олимпийских игр «Сочи-2014» (Пигольцина, 2009).

Представленный выше достаточно широкий спектр областей применения мезо- и микроклиматической информации далеко не исчерпывает всех аспектов ее использования. Однако приведенных примеров вполне достаточно, чтобы оценить реальную необходимость учета мезо- и микроклимата при комплексных оценках природно-климатических ресурсов конкретных территорий.

#### **Принципы учета мезо- и микроклимата при комплексных оценках природных ресурсов**

Главным принципом учета мезо- и микроклимата при оценке природно-климатических ресурсов являются комплексность и системность исследований макро-, мезо- и микроклиматов, основанных на единой методике. Методологической основой для решения этой задачи является последовательное рассмотрение климатических факторов на всех иерархических уровнях, которое позволяет представить информацию макроклиматического уровня (зональную), мезоклиматического уровня (региональную) и микроклиматического уровня (местную или конкретную).

При использовании макроклиматической информации дается оценка зональных климатов, характеризующих равнинные однородные территории. В качестве исходной информации для расчета климатических показателей в этом случае используются данные

репрезентативных (в широком смысле) метеорологических станций, т. е. характеризующих метеорежим открытого места равнинных территорий. Информация макроклиматического уровня позволяет выполнять зональное климатическое районирование.

Информация мезоклиматического уровня используется для характеристики региональных, в первую очередь областных, мезоклиматов. Мезоклиматические показатели рассчитываются по данным метеостанций, репрезентативных уже в более узком смысле. Данные этих станций отражают метеорежим ровного открытого места определенного типа подстилающей поверхности (типологического ландшафта), что дает возможность экстраполировать данные при мезоклиматическом районировании даже при ограниченной метеорологической информации.

Источником микроклиматической информации являются данные метеостанций, расположенных в различных условиях подстилающей поверхности и характеризующих конкретные микроклиматические условия своего местоположения. Привязка этих данных осуществляется к фоновой (мезоклиматической) информации. Кроме того, дополнительным источником микроклиматических данных служат специальные экспериментальные наблюдения, результаты которых должны быть увязаны с режимной информацией по известной методике (Методические указания, 1985). Микроклиматический уровень позволяет выполнить детальное микроклиматическое районирование ограниченных территорий любой сложности и дать количественную оценку изменений климатических ресурсов под влиянием деятельной поверхности с большой степенью подробности.

Таким образом, принципы детального микроклиматического районирования заключаются в последовательном рассмотрении климатических факторов на всех иерархических уровнях. В результате на каждой ступени районирования может быть использован тот же показатель, что и на предыдущей ступени, если он сохраняет «чувствительность» к неоднородностям подстилающей поверхности. В противном случае данный показатель заменяется другим показателем, который качественно (и количественно) более детально характеризует рассматриваемый климатообразующий фактор.

Система многоступенчатого районирования должна, прежде всего, содержать комплексные показатели, отражающие потенциально возможные природные ресурсы — орографические, климатические, почвенные и т. д. Выбор конкретных климатических показателей для микроклиматического районирования зависит от цели и практической задачи исследования.

Мезо- и микроклиматические оценки и районирование территории могут быть выражены как в абсолютных, так и в относительных единицах, которые представляют собой отношения или разности между показателями при данном типе мезо- и микроклимата и их фоновыми значениями. Предпочтение часто отдается относительным величинам (поправкам), поскольку их временная изменчивость в несколько раз меньше, чем изменчивость самих метеорологических величин. В настоящее время имеется система мезо- и микроклиматических поправок, которые можно использовать для получения детальной пространственной характеристики местности.

Рассмотрим принципы многоступенчатого районирования на примере составления микроклиматической карты района Холодинского полиметаллического месторождения. Район расположен на территории Восточной Сибири в сложных физико-географических условиях и представляет собой горный район, характеризующийся значительной неоднородностью подстилающей поверхности. Основными климатическими факторами, лимитирующими хозяйственное освоение данной территории для размещения промышленных комплексов и населенных пунктов, являются суровые условия зимы и резкая континентальность климата, обуславливающая образование мощных инверсий. В связи с этим запрос градостроителей касался, в первую очередь, детальной оценки этой сложной территории по зимнему термическому режиму и потенциальным локальным условиям загрязнения воздуха.

Основными климатическими показателями, наиболее полно характеризующими суровые условия зимы по термическому режиму и используемыми при строительном проектировании, являются расчетные температуры: средний из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха ( $T_m$ ), температура самой холодной пятидневки ( $T_n$ ), вентиляционная зимняя температура ( $T_B$ ).

Расчетная вентиляционная зимняя температура — это средняя температура наиболее холодной части отопительного периода. Эти показатели отличаются исключительной чувствительностью к неоднородностям подстилающей поверхности и позволяют дать детальную характеристику территории.

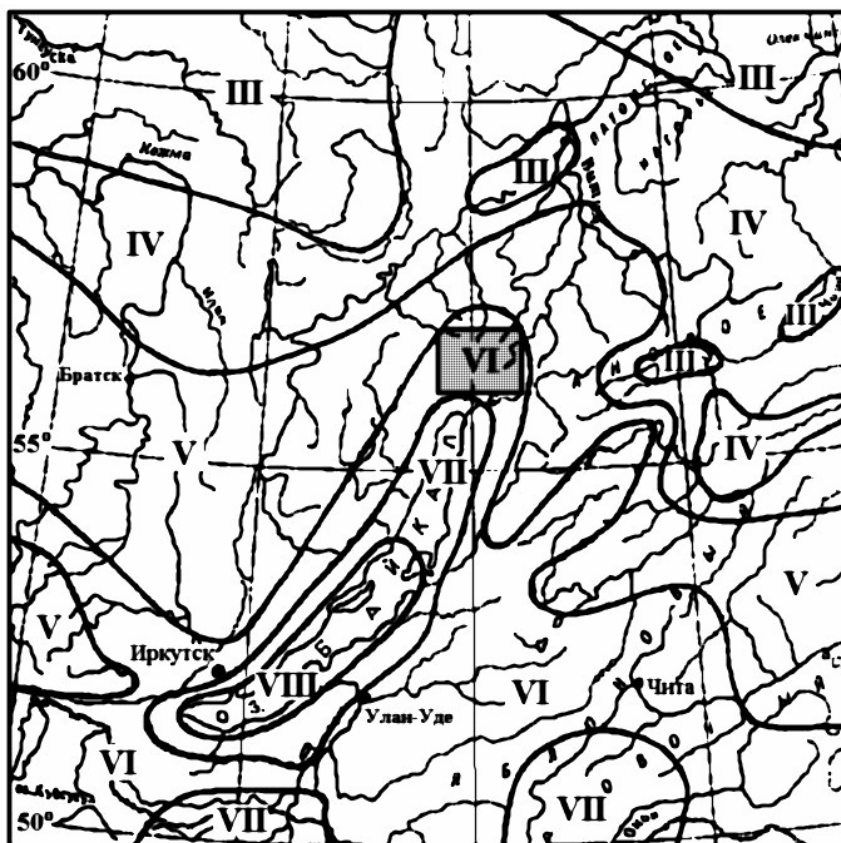
В соответствии с указанными выше принципами детальной оценки пространственной изменчивости параметров климата исследование начинается с оценки зонального (макроклиматического) распределения рассматриваемых климатических показателей. На рис. 5 представлен фрагмент карты климатического районирования Восточной Сибири по температуре самой холодной пятидневки ( $T_{п}$ ) в масштабе 1 : 12 500 000.

На карте (см. рис. 5) выделен достаточно большой контур, в который входит территория прииска. Весь контур расположен в рамках одного макроклиматического района (VI). Значения  $T_{п}$  в этом районе служат фоновой информацией для расчета мезоклиматической изменчивости термических характеристик в пределах выделенного контура.

На рис. 6 представлено мезоклиматическое районирование указанного контура в масштабе 1:2 500 000, и здесь уже выделяется два района по температуре самой холодной пятидневки.

В свою очередь, на мезоклиматической карте (см. рис. 6) выделен контур района изысканий, т. е. территория непосредственного расположения Холоднинского полиметаллического месторождения, для которой требуется построить микроклиматическую карту. Вся территория прииска расположена в пределах одного мезоклиматического района (I), поэтому значение  $T_{п}$  для этого района принимается в качестве фоновой информации для расчета микроклиматической изменчивости этого показателя.

На рис. 7 приведена микроклиматическая карта исследуемого района по термическим характеристикам зимы в относительных единицах. В данном случае использование относительных единиц позволяет по одной карте определить абсолютные значения всех трех термических показателей ( $T_{п}$ ,  $T_{м}$ ,  $T_{в}$ ), поскольку величина относительных значений у них одинакова.



Масштаб 1 : 12 500 000

Рис. 5. Фрагмент карты климатического районирования Восточной Сибири по температуре самой холодной пятидневки ( $T_n$ ).

| Макрорайон ... | III       | IV        | V         | VI        | VII       | VIII      |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $T_n$ °С.....  | -55...-51 | -50...-46 | -45...-41 | -40...-36 | -35...-31 | -30...-26 |

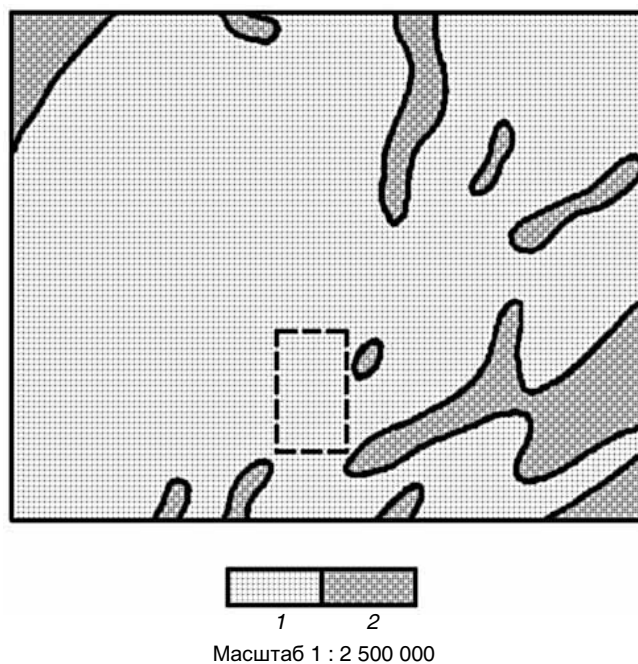


Рис. 6. Мезоклиматическое районирование фрагмента, выделенного на карте (см. рис. 5) климатического районирования по температуре самой холодной пятидневки ( $T_{п}$ ).

1)  $T_{п} = -40...-44$  °С; 2)  $T_{п} = -44...-48$  °С.

В табл. 3 приведены характеристики выделенных микроклиматических районов по сгруппированным формам рельефа и относительные значения термических показателей ( $T_{м}$ ,  $T_{п}$ ,  $T_{в}$ ), которые показывают величину отклонения показателей в конкретном местоположении от их фоновых значений, характеризующих нормальные местоположения (район 2 на рис. 7) и соответствующих фоновой мезоклиматической информации.

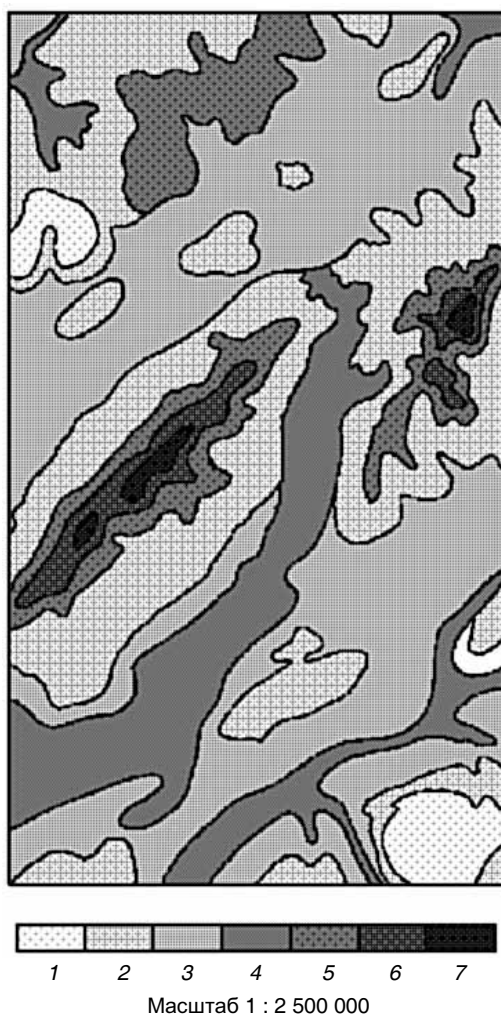


Рис. 7. Микроклиматическое районирование фрагмента, выделенного на мезоклиматической карте (см. рис. 6) по температуре самой холодной пятидневки ( $T_n$ ).

Усл. обозначения 1—7 см. табл. 3.

Таблица 3

**Изменение  $T_m$ ,  $T_n$  и  $T_b$  в зависимости от рельефа местности  
в районе Холоднинского полиметаллического месторождения  
и оценка условий естественной аэрации**

| Номер<br>рай-<br>она на<br>рис. 7 | Местоположение | $\Delta T_m, \Delta T_n,$<br>$\Delta T_b$ °С | Условия<br>естест-<br>венной<br>аэрации | Оценка,<br>баллы |
|-----------------------------------|----------------|--|---|------------------|
|-----------------------------------|----------------|--|---|------------------|

*Районы с инверсионным распределением температуры с высотой*

|   |   |    |              |   |
|---|---|----|--------------|---|
| 1 | Вершины и верхние части склонов   | 2  | Хорошие      | 4 |
| 2 | Нормальное местоположение (открытые ровные участки), плоские вершины, средние части склонов крутизной 5—10° | 0  | Нормальные   | 3 |
| 3 | Широкие (до 5—10 км в поперечнике) долины (относительные превышения 150—300 м), нижние части склонов        | -2 | Затрудненные | 2 |
| 4 | Узкие (до 2—4 км в поперечнике) долины (относительные превышения < 150 м)                                   | -4 | Плохие       | 1 |

*Районы с нормальным понижением температуры с высотой*

|   |                           |    |               |   |
|---|---------------------------|----|---------------|---|
| 5 | Высотный пояс 1600—1800 м | -1 | Очень хорошие | 5 |
| 6 | Высотный пояс 1800—2000 м | -2 | Очень хорошие | 5 |
| 7 | Высотный пояс > 2000 м    | -3 | Очень хорошие | 5 |

Примечание. Знак «плюс» означает положительные отклонения, знак «минус» — отрицательные отклонения  $T_m$ ,  $T_n$  и  $T_b$  по сравнению с нормальным местоположением, имеющим следующие значения фоновой мезоклиматической информации:  $T_m = -44... -45$  °С,  $T_n = -40... -41$  °С,  $T_b = -28... -29$  °С.



В табл. 3 также дана качественная оценка возможного потенциала локального загрязнения воздуха в результате промышленного освоения района. Самые хорошие условия аэрации (5 баллов), естественно, относятся к высокогорным районам с нормальным понижением температуры с высотой и усилением ветра. Однако в этих районах значительно возрастает суровость температурно-ветрового режима зимой, ухудшаются биоклиматические условия проживания и работы человека на открытом воздухе, что ограничивает их возможное хозяйственное освоение. В 4 балла оцениваются оптимальные площадки для строительства населенных пунктов и размещения промышленных комплексов, характеризующиеся наилучшими биомикроклиматическими условиями по термическому режиму и меньшей смогоопасностью. В 1—2 балла оцениваются местоположения, непригодные или малопригодные для строительства населенных пунктов и размещения промышленных объектов, в силу высокой смогоопасности и более жестких термических условий зимы.

Рассмотренные принципы детализации климатических ресурсов, основанные на взаимосвязи между факторами природной среды, и разработанные методы количественной оценки микроклиматической изменчивости основных элементов климата позволяют дать детальную микроклиматическую характеристику территорий даже при недостаточном метеорологическом освещении местности.

Приведенные примеры по использованию мезо- и микроклиматической информации однозначно показывают, что эколого-климатическая оценка конкретных территорий и объектов исследования невозможна на основании использования только общеклиматической информации — необходим учет мезо- и микроклиматических особенностей территории.

### **Заключение**

Весь спектр научно-практических задач, решаемых в области микроклиматологии, направлен на выдачу разнообразной мезо- и микроклиматической информации потребителю для обеспечения

оптимального использования природно-климатических ресурсов конкретных территорий различными секторами экономики. Однако на современном этапе хозяйственного освоения климата реализация задачи оперативного и эффективного использования результатов мезо- и микроклиматических исследований в производственной практике и целенаправленных научных исследованиях требует совершенствования системы микроклиматического обеспечения.

В связи с этим одной из важнейших задач ближайшего будущего должна стать разработка микроклиматических ГИС-проектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агроклиматические ресурсы Ленинградской области, 1971. — Л.: Гидрометеоздат. — 119 с.

Адаменко В. Н., 1979. Мелиоративная микроклиматология. — Л.: Гидрометеоздат. — 184 с.

Береснева И. А., 2006. Климаты аридной зоны Азии. — М.: Наука. — 287 с.

Гольцберг И. А., 1961. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними. — Л.: Гидрометеоздат. — 198 с.

Гольцберг И. А., 1977. Мезо- и микроклиматическое районирование Ленинградской области. — Труды ГГО, вып. 385, с. 39—50.

Горышина Н. Г., 1979. Учет температуры пахотного слоя почвы / Руководство по изучению микроклимата для целей сельскохозяйственного производства. — Л.: Гидрометеоздат, с. 67—73.

Горышина Н. Г., Никифорова Н. П., Платонов В. А., 1981. Роль микроклимата при принятии технологических решений в практике сельского хозяйства. — Труды ГГО, вып. 460, с. 81—87.

Методические указания по обобщению результатов микроклиматических исследований для целей сельскохозяйственного производства, 1985. — Л.: Гидрометеоздат. — 87 с.

Микроклимат СССР, 1967 / Под ред. И. А. Гольцберг. — Л.: Гидрометеоздат. — 284 с.

Микроклимат холмистого рельефа и его влияние на сельскохозяйственные культуры, 1962 / Под ред. И. А. Гольцберг. — Л.: Гидрометеоздат. — 250 с.

Мищенко З. А., 1984. Биоклимат дня и ночи. — Л.: Гидрометеоздат. — 280 с.

Огурцов А. Н., Разживин В. Ю., Пигольцина Г. Б., Хованов Н. В., 2007. Геоинформационный анализ и синтез показателей устойчивости почвенного покрова к загрязнению нефтяными углеводородами при информационном дефиците. — В сб.: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Материалы международной конференции ИнтерКарто/ИнтерГИС 13. — Ханты-Мансийск, Йеллоунайф.

Пигольцина Г. Б., 1987. Мезо- и микроклиматическая изменчивость радиационного режима Ленинградской области. — Труды ГГО, вып. 385, с. 39—50.

Пигольцина Г. Б., 2003. Радиационные факторы мезо- и микроклимата. — СПб: СПбГЛТА. — 200 с.

Пигольцина Г. Б., Зиновьева Н. А., 2009. Микроклиматические особенности территории проведения зимних Олимпийских игр «Сочи-2014» и методы их оценки. — Труды ГГО, вып. 559, с. 56—75.

Романова Е. Н., 1977. Микроклиматическая изменчивость основных элементов климата. — Л.: Гидрометеиздат. — 288 с.

Романова Е. Н., 1989. Учет мезо- и микроклимата при оптимизации размещения сельскохозяйственных культур в пределах агропромышленных комплексов. — Л.: Гидрометеиздат. — 45 с.

УДК 551.510.04

**ФОНОВЫЙ УРОВЕНЬ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ  
ПО МНОГОЛЕТНИМ ДАННЫМ О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ  
АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ**

*П. Ф. Свистов, А. И. Полищук, Н. А. Першина*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: polisch@main.mgo.rssi.ru, pernat948@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2009, после доработки 23.09.2009

Химический состав атмосферных осадков (ХСО) относится к важнейшим интегральным характеристикам загрязнения атмосферы, так как основные компоненты осадков приобретаются в ходе образования облачных элементов, в период существования облачных систем и при выпадении осадков (вымывании). При этом под вымыванием подразумеваются не только растворение аэрозольных и газообразных примесей воздуха в облачных элементах и захват их падающими капельками или снежинками, но и механическое осаждение с потоком, создаваемым осадками. Возможно, последний механизм становится решающим, когда осадки попадают в более сухие (нижние) слои атмосферы (Селезнева, 1980).

Изучение состава осадков на сети так называемых фоновых станций включено в международную программу, главной задачей которой являются контроль за глобальным распространением примесей в атмосфере и оценка тенденции их влияния на климат и биосферу (Strategy 2001—2007, Strategy 2008—2015).

Для станций фонового мониторинга свойственны определенные характеристики ХСО: низкая минерализация и узкий диапазон варьирования, преобладающая роль природных факторов при формировании состава осадков. Так, осадки приморских районов характеризуются повышенным содержанием ионов натрия и хлора, а горных — гидрокарбонатов и иона кальция (Свистов и др., 2006). Данные фоновых станций позволяют составить представление о естественном уровне загрязнения атмосферного воздуха.

Регулярные наблюдения за ХСО в СССР впервые были организованы Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова в конце 50-х годов в период Международного геофизического года (1957—1958 гг.) и следующего за ним года Международного геофизического сотрудничества (1959 г.). Вся методология мониторинга состава осадков, включая методики химического анализа, была разработана специалистами ГГО под руководством проф. Е. С. Селезневой. С начала 70-х годов наблюдения за ХСО входили в обязательную программу наблюдений международной сети фоновых мониторинга атмосферы БАПМОН (в настоящее время сеть Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО). На территории нашей страны расположено пять фоновых станций: Усть-Вышь (Республика Коми), Шаджатмаз (Северный Кавказ), Памятная (Курганская область), Туруханск (Красноярский край), Хужир (о. Ольхон на Байкале). В дальнейшем их число увеличилось за счет ряда биосферных заповедников: Воронежский (в центре Европейской части России (ЕЧР)), Приокско-Тerrasный (в центре ЕЧР), Кавказский (в западной части Предкавказья), Баргузинский (в северо-восточной части оз. Байкал), Сихоте-Алинский (станция Терней в Приморье). Все десять станций (в качестве фоновых региональных) входят в международную сеть ГСА.

На рис. 1 приведена карта станций фоновых уровней химического состава атмосферных осадков — региональная сеть ГСА ВМО на территории Российской Федерации (РФ). В настоящей работе к ним добавлены две станции — Воейково (ЕЧР) и Хамар-Дабан (район оз. Байкал).

Примерно на 60 % химический состав осадков на этих станциях определяется соответствующей природной зоной и местными погодными условиями, от которых в значительной степени зависит также и режим осадков. В 10—15 % случаев их минерализацию можно считать фоновой. Общепринятое определение этого понятия до сих пор отсутствует. Считается, что обложные осадки, выпавшие в сельской местности вдали от любых источников загрязнения, содержат минимально возможные (фоновые) концентрации компонентов. Величина рН таких осадков близка к 5,6. Логично предположить, что их состав должен отражать

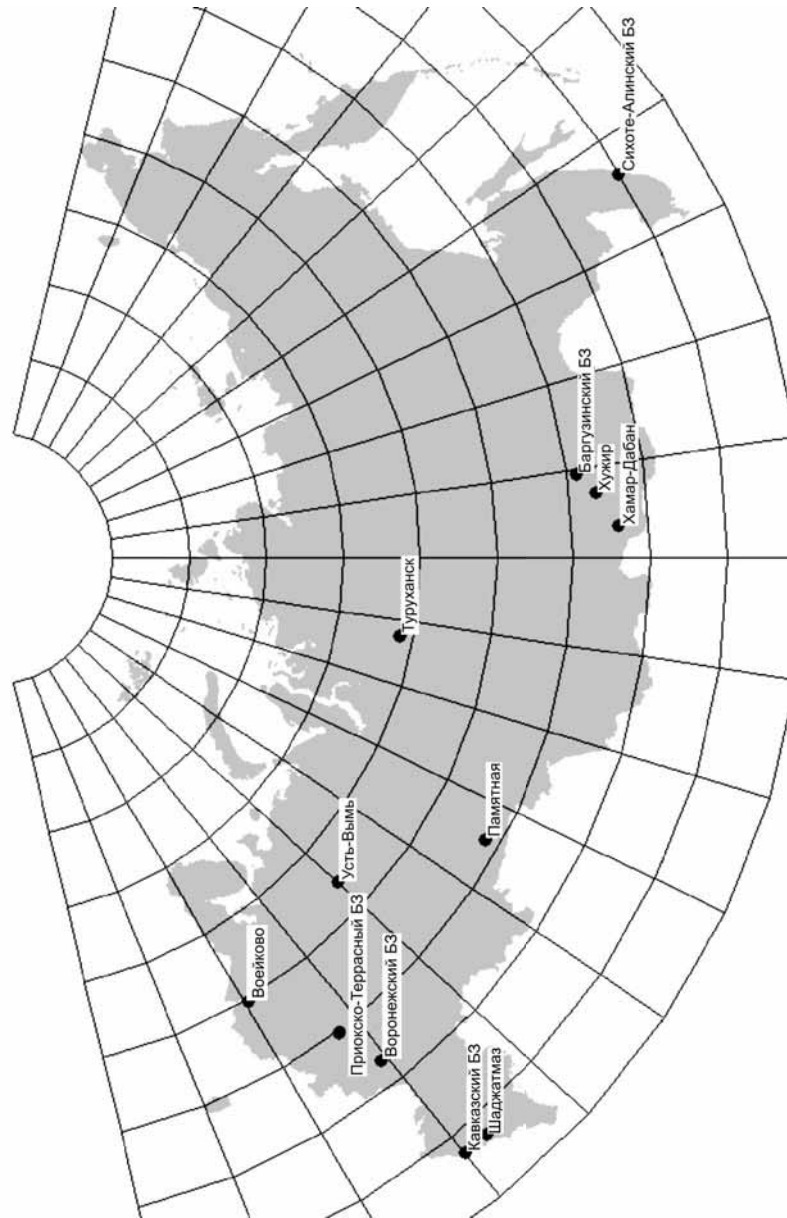


Рис. 1. Российские станции фонового уровня химического состава атмосферных осадков.

в основном природу ядер конденсации. Считается, что при их отсутствии, как и при отсутствии достаточного влагосодержания, высокой относительной влажности и циркуляционных процессов, образование облаков и осадков вообще невозможно. Поскольку абсолютный минимум минерализации осадков соответствует примерно дистиллированной воде, рассмотрим некоторые ее свойства. Даже хорошо очищенная вода обладает небольшой проводимостью (0,05 мкСм/см). При контакте с атмосферным воздухом она за счет растворения диоксида углерода приобретает при температуре 18 °С удельную электропроводность 0,75—1,0 мкСм/см. Такая равновесная с воздухом вода содержит до 0,5 мг/л суммы карбонатов, кислотность ее характеризуется значением рН = 5,6.

При понижении температуры до 0 °С концентрация карбонатов возрастает до 1,0 мг/л и более, а кислотность за счет некоторой буферности карбонатных систем остается прежней. К этому следует добавить, что по ориентировочным оценкам (по закону Генри) минерализация, создаваемая постоянным присутствием в воздухе оксидов серы, азота, хлористоводородной кислоты ( $10^{-5}$ — $10^{-7}$  % по объему) и аэрозолей (Селезнева и др., 1968), дает прибавку к сумме ионов около 0,2 мг/л. Особенно большое влияние на фоновую минерализацию осадков оказывает аммиак. В присутствии 3 мкг/м<sup>3</sup> аммиака и среднем содержании углекислого газа в воздухе (0,035 % по объему) при рН = 7,0 минерализация может достигать 5,9 мг/л ( $[\text{NH}_4^+] = 2,6$  мг/л и  $[\text{HCO}_3^-] = 3,3$  мг/л) (Юнге, 1965).

Таким образом, независимо от условий и места выпадения атмосферных осадков их минерализация, в принципе, не может быть ниже 0,3 мг/л. Анализ фактических данных за 50-летний период наблюдений за ХСО показывает, что абсолютный минимум общей минерализации отдельных (единичных) выпадений составляет 0,34 мг/л (при температуре 18—25 °С).

Верхний уровень минерализации, обусловленный влиянием углекислого газа и других естественных микропримесей воздуха, при рН ≈ 5,6 и температуре около 0 °С (свободная атмосфера) близок к 2,0 мг/л. По экспериментальным данным средневзвешенная величина суммы ионов для интервала 0,3—2,0 мг/л составляет 1,1 мг/л. Для всех станций фоновое значение стандартное

отклонение минимальной минерализации близко к 0,5 мг/л. В качестве верхнего фонового уровня можно взять значение  $3\sigma$ , где  $\sigma$  — стандартное отклонение при  $n = 105$ . Следовательно, сумму ионов в интервале 0,3—3,0 мг/л (удельная электропроводность  $\leq 6$  мкСм/см) можно принять за абсолютный минимальный уровень минерализации атмосферных осадков (*межрегиональный или глобальный фон*). Данные табл. 1 и 2 по общей минерализации хорошо согласуются с выбранным интервалом.

Качественный и количественный состав определений, указанных выше, позволяет судить о природе облакообразующих веществ. По данным 200 измерений в интервале 0,3—3,0 мг/л в 4 % случаев в осадках отсутствовали хлориды, в 12 % — сульфаты, по 15 % — ионы аммония и нитраты. Гидрокарбонаты и натрия присутствовали почти постоянно во всех пробах при  $\text{pH} \geq 5,4$ . Не отмечено ни одного случая одновременного отсутствия в осадках сульфатов и хлоридов. Величина  $\text{pH}$  изменяется в пределах 4,7—5,8. Фоновые осадки на 65 % состоят из сульфатов, в 10—11 % случаев могут преобладать хлориды, нитраты или гидрокарбонаты. Для каждого из 11 компонентов состава осадков средние значения по европейской и азиатской части России укладываются в удвоенное значение стандартного отклонения. Разность средних значений по регионам незначительна (табл. 1). Например, для сульфатов она равна  $0,17 \pm 0,09$  мг/л, критерий Стьюдента  $t = 1,9$ . С вероятностью 99,9 % можно утверждать, что эти значения принадлежат одной и той же совокупности.

Облачная вода, собранная на высоте 3300 м над Черным морем, вообще не содержала хлоридов, и конденсация водяного пара происходила, по-видимому, на гидрокарбонатах и сульфатах. На крайнем Северо-Западе России (Кольский полуостров) станции Падун и Зареченск по величине минерализации относятся к фоновым, однако кислотность их была в 1,5—2,0 раза выше, чем в среднем по региону. Тип вод хлоридный или сульфатный, гидрокарбонаты отсутствовали. Коэффициент корреляции между содержанием сульфатов и концентрацией ионов водорода не ниже 0,7, что свидетельствует, по-видимому, о присутствии слабого раствора серной кислоты.



Таблица 1

Средние минимальные значения концентрации ионов на станциях фонового уровня  
за период 1958—2005 гг.

| Станция                   | Концентрация, мг/л            |                 |                              |                               |                              |                 |                |                  |                  |                  |             | pH         | k<br>МКгСм/см |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-------------|------------|---------------|
|                           | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | Cl <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>+2</sup> | Mg <sup>+2</sup> | Zn <sup>+2</sup> | M           |            |               |
| Усть-Вьльмь               | 0,71                          | 0,36            | 0,43                         | 0,23                          | 0,36                         | 0,09            | 0,06           | 0,23             | 0,05             | 0,01             | 2,52        | 5,4        | 6,9           |
| Воейково                  | 0,93                          | 0,30            | 0,03                         | 0,06                          | 0,09                         | 0,09            | 0,04           | 0,09             | 0,07             |                  | 1,70        | 5,2        | 4,3           |
| Приокско-<br>Террасный БЗ | 0,59                          | 0,47            | 0,63                         | 0,26                          | 0,21                         | 0,16            | 0,07           | 0,23             | 0,04             |                  | 2,66        | 5,3        | 7,4           |
| Кавказский БЗ             | 0,62                          | 0,49            | 0,38                         | 0,23                          | 0,24                         | 0,14            | 0,09           | 0,19             | 0,03             |                  | 2,43        | 5,3        | 7,2           |
| Шаджатмаз                 | 0,53                          | 0,48            | 0,13                         | 0,49                          | 0,39                         | 0,12            | 0,07           | 0,20             | 0,04             | 0,22             | 2,58        | 5,6        | 7,4           |
| <b>Среднее по БЧР</b>     | <b>0,68</b>                   | <b>0,42</b>     | <b>0,32</b>                  | <b>0,26</b>                   | <b>0,26</b>                  | <b>0,12</b>     | <b>0,07</b>    | <b>0,19</b>      | <b>0,04</b>      | <b>0,08</b>      | <b>2,38</b> | <b>5,4</b> | <b>7,0</b>    |
| Туруханск                 | 0,45                          | 0,49            | 0,15                         | 0,29                          | 0,05                         | 0,14            | 0,07           | 0,16             | 0,08             | 0,10             | 1,89        | 5,3        | 4,6           |
| Хужир                     | 0,37                          | 0,46            | 0,19                         | 0,48                          | 0,05                         | 0,12            | 0,08           | 0,28             | 0,06             |                  | 2,08        | 5,7        | 4,6           |
| Хамар-Дабан               | 0,40                          | 0,36            | 0,20                         | 0,34                          | 0,06                         | 0,09            | 0,05           | 0,20             | 0,09             |                  | 1,78        | 5,5        | 5,0           |
| Терней                    | 0,82                          | 0,41            | 0,12                         | 0,39                          | 0,21                         | 0,15            | 0,12           | 0,11             | 0,03             | 0,03             | 2,39        | 5,3        | 6,6           |
| <b>Среднее по АЧР</b>     | <b>0,51</b>                   | <b>0,43</b>     | <b>0,16</b>                  | <b>0,37</b>                   | <b>0,09</b>                  | <b>0,13</b>     | <b>0,08</b>    | <b>0,19</b>      | <b>0,06</b>      | <b>0,07</b>      | <b>2,03</b> | <b>5,5</b> | <b>5,3</b>    |

Таблица 2

Абсолютные минимальные значения концентрации ионов в облачной воде и в осадках  
по отдельным станциям РФ

| Станция                 | Концентрация, мг/л            |                 |                              |                               |                              |                 |                |                  |                  |      | pH  | k<br>мкСм/см |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------|-----|--------------|
|                         | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | Cl <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>+2</sup> | Mg <sup>+2</sup> | M    |     |              |
| Падун                   | 0,6                           | 0,8             | 0,4                          | 0,0                           | 0,14                         | 0,2             | 0,11           | 0,1              | 0,03             | 2,3  | 4,7 | 10,0         |
| Зареченск               | 0,7                           | 0,6             | 0,4                          | 0,1                           | 0,13                         | 0,2             | 0,10           | 0,2              | 0,04             | 2,5  | 5,0 | 8,0          |
| Монды                   | 0,35                          | 0,15            | 0,26                         | 0,37                          | 0,06                         | 0,05            | 0,03           | 0,15             | 0,01             | 1,5  | 5,2 | 3,5          |
| Баргузинский БЗ         | 0,28                          | 0,27            | 0,24                         | 0,45                          | 0,06                         | 0,11            | 0,06           | 0,17             | 0,06             | 1,7  | 5,6 | 3,7          |
| Романовка               | 0,15                          | 0,65            | 0,12                         | 0,53                          | 0,07                         | 0,21            | 0,17           | 0,25             | 0,07             | 2,2  | 5,8 | 4,8          |
| Палатка                 | 0,6                           | 0,7             | 0,1                          | 0,3                           | 0,13                         | 0,1             | 0,05           | 0,1              | 0,12             | 2,1  | 5,4 | 4,0          |
| Облачная вода           | 0,7                           | 0,4             | 0,4                          | 0,4                           | 0,09                         | 0,1             | 0,10           | 0,2              | 0,12             | 2,5  | 5,4 | 6,0          |
| Осадки над океаном      | 0,6                           | 1,3             | 0,0                          | 0,6                           | 0,06                         | 0,9             | 0,05           | 0,1              | 0,07             | 3,6  | 5,4 | 9,0          |
| Палатка (единичная)     | 0,0                           | 0,9             | 0,2                          | 0,4                           | 0,1                          | 0,2             | 0,1            | 0,1              | 0,1              | 2,1  | 5,4 | 4,0          |
| Воейково (единичная)    | 0,0                           | 0,28            | 0,0                          | 0,37                          | 0,0                          | 0,1             | 0,0            | 0,08             | 0,1              | 0,93 | 5,4 | 3,0          |
| Монды (единичная)       | 0,41                          | 0,0             | 0,27                         | 0,06                          | 0,06                         | 0,02            | 0,01           | 0,06             | 0,01             | 0,9  | 5,4 | 2,0          |
| Вода из облаков, 3,3 км | 0,35                          | 0,0             | 0,07                         | 0,65                          | 0,02                         | 0,15            | 0,1            | 0,1              | 0,12             | 1,95 | 5,8 | 3,6          |

Глобальный фоновый состав осадков слабо зависит от влияния подстилающей поверхности и определяется главным образом микрофизическими процессами образования облаков. Источниками примесей могут служить Мировой океан, выбросы вулканов, выделения паров и газов из литосферы, перемещение веществ из верхней стратосферы и космическая пыль.

В химическом составе осадков фоновых станций имеется еще одна особенность, связанная с минимальными месячными значениями. Их среднее значение обладает заметной устойчивостью. На примере 2008 г. (табл. 2) видно, что для всех станций сравнительно невысока общая минерализация осадков, которая находится в интервале 7—9 мг/л при стандартном отклонении по данным всех исходных измерений не больше 2,5 мг/л. Среднее значение всего в 2,5—3 раза превышает глобальный фоновый уровень. В недельных пробах колебания больше — от 2 до 30 мг/л. Верхний предел относится, главным образом, к горным станциям. Осадки на азиатской части России (АЧР), вообще, содержат много карбонатов — продуктов выветривания горных пород. При этом максимальные концентрации магния в отдельных пробах могут быть на АЧР в 2—3 раза выше, чем на европейской части.

Впервые карта распределения *минимальных месячных значений* минерализации атмосферных осадков была подготовлена и опубликована Е. С. Селезневой в 1978 г. (Селезнева, 1978). Величина интервала суммы ионов составляла от 3 до 7 мг/л с шагом 2 мг/л, т. е. нижний предел суммы ионов совпадает с верхним глобальным фоновым уровнем. Если сделать выборку минимальных значений минерализации ( $M_{\text{мин}}$ , см. табл. 3) по месячным данным за 2008 г., то среднее значение близко к 5 мг/л с отклонением  $\pm 2,5$  мг/л, т. е. сумма ионов осталась практически неизменной в течение 30 лет. Вслед за Селезневой можно принять диапазон минерализации осадков 3—7 мг/л за *региональный фоновый состав осадков* с верхним пределом 12,5—15 мг/л ( $M_{\text{ср}} + 3\sigma$ ). Этот же вывод сделан по результатам анализа в публикации авторов (Свистов и др., 2006).

Рассмотрим далее вариации ХСО по фоновым станциям на примере 2008 г. Среднегодовая сумма ионов в осадках по данным

за 2008 г. уменьшилась по сравнению с 2007 г. (Свистов и др., 2008) с 9,6 до 8,5 мг/л и фактически вернулась к уровню 2006 г. (8,3 мг/л) (Свистов и др., 2007). Колебания средней минерализации находились в интервале от 4,6 до 16,5 мг/л (табл. 3). Характерной особенностью 2008 г. следует считать повсеместное уменьшение минерализации на всех станциях АЧР от 26 % (Хамар-Дабан) до более чем в 2 раза (Терней). На ЕЧР сумма ионов заметно возросла только в Кавказском БЗ (в 2 раза) и Воронежском БЗ (на 28 %). Абсолютные минимальные значения по месячным данным составляли 2,2—4,9 мг/л, а абсолютные максимальные значения за месяц достигали (мг/л): 12,5 (Усть-Вымь), 15,8 (Воейково), 19,9 (Воронежский БЗ), 29,6 (Шаджатмаз), 16,6 (Туруханск), 46,1 (Хамар-Дабан) и 23,2 (Терней). Все максимальные значения (за исключением Хамар-Дабана) значительно ниже, иногда в 2—3 раза, соответствующих значений за предшествующий год.

Минерализация осадков на всех станциях определяется двумя компонентами: сульфатами и гидрокарбонатами, которые вместе составляют не менее 50 % суммы ионов; из катионов преобладают кальций и натрий. В средних за год значениях концентрация хлоридов нигде не выходит за пределы 0,5—1,2 мг/л. Содержание сульфатов превалирует на ЕЧР (Усть-Вымь, Воейково, Приокско-Террасный и Воронежский БЗ). Районы предгорий Кавказа (Кавказский БЗ, Шаджатмаз) и Байкала (Хамар-Дабан) резко выделяются повышенным содержанием гидрокарбонатов, которые составляют до 30 % суммы ионов.

На качественный химический состав осадков на равнинных станциях ЕЧР и в Сихотэ-Алинском БЗ (АЧР) основное влияние оказывает, по-видимому, загазованность воздуха оксидами серы и азота; на АЧР и в горных районах в содержании гидрокарбонатов традиционно проявляется более высокая запыленность атмосферы.

Если рассматриваемый период наблюдений (2000—2008 гг.) разбить на два интервала: 2000—2004 и 2005—2008 гг., то средние интервальные значения становятся более определенными. На ЕЧР минерализация осадков в среднем уменьшилась на 22 % (от 9,7 до 7,6 мг/л) и более чем в два раза по максимальным значениям при сохранении минимального на уровне 4,5 мг/л. Соответственно

Таблица 3

## Средневзвешенная концентрация ионов на станциях фонового уровня в 2008 г.

| Станция          | Сумма осадков, мм | Концентрация, мг/л            |                 |                              |                               |                              |                 |                |                  |                  |      |       | pH   | k<br>мкСм/см |                  |
|------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------|-------|------|--------------|------------------|
|                  |                   | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | Cl <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>+2</sup> | Mg <sup>+2</sup> | Zn   | M     |      |              | M <sub>мин</sub> |
| Усть-Вымь        | 702,4             | 1,61                          | 0,65            | 0,95                         | 1,26                          | 0,39                         | 0,55            | 0,32           | 0,98             | 0,22             |      | 6,93  | 4,93 | 5,7          | 18,8             |
| Войково          | 831,3             | 1,94                          | 0,59            | 1,44                         | 0,81                          | 0,46                         | 0,39            | 0,20           | 0,67             | 0,14             |      | 6,64  | 4,98 | 5,9          | 19,4             |
| Пр.-Террасный БЗ | 765,3             | 1,19                          | 0,49            | 1,03                         | 1,17                          | 0,22                         | 0,30            | 0,18           | 0,88             | 0,16             |      | 5,62  | 3,71 | 5,9          | 13,5             |
| Воронежский БЗ   | 442,6             | 3,02                          | 1,16            | 2,28                         | 1,89                          | 0,64                         | 1,14            | 0,51           | 1,07             | 0,16             | 0,01 | 11,88 | 6,61 | 5,9          | 24,1             |
| Кавказский БЗ    | 1722,7            | 1,80                          | 0,57            | 0,88                         | 3,52                          | 0,12                         | 0,66            | 0,22           | 1,38             | 0,19             |      | 9,34  | 2,21 | 6,0          | 16,8             |
| Шаджат-маз       | 631,9             | 1,61                          | 0,60            | 0,91                         | 3,23                          | 0,30                         | 0,31            | 0,22           | 1,26             | 0,31             |      | 8,76  | 5,86 | 6,5          | 29,6             |
| Туруханск        | 593,4             | 1,76                          | 1,04            | 0,69                         | 3,48                          | 0,47                         | 0,95            | 0,30           | 0,50             | 0,32             |      | 9,51  | 4,95 | 6,2          | 19,7             |
| Хужир            | 222,5             | 1,56                          | 0,52            | 0,45                         | 1,82                          | 0,30                         | 0,16            | 0,15           | 0,31             | 0,27             |      | 5,55  | 5,41 | 6,4          | 28,2             |
| Хамар-Дабан      | 1810,4            | 3,25                          | 0,98            | 0,47                         | 7,67                          | 0,51                         | 0,67            | 0,49           | 0,85             | 1,62             |      | 16,51 | 9,59 | 6,7          | 26,0             |
| Терней           | 1376,4            | 1,80                          | 0,78            | 0,69                         | 0,12                          | 0,25                         | 0,42            | 0,12           | 0,28             | 0,06             | 0,03 | 4,56  | 3,11 | 5,2          | 22,2             |

изменились концентрации отдельных компонентов: сульфатов и гидрокарбонатов от 2,1 до 1,6 мг/л и хлоридов от 1,0 до 0,7 мг/л. На АЧР понижение средней минерализации незначительно и составляет около 9 %, абсолютное максимальное значение суммы ионов уменьшилось от 34,2 до 20,7 мг/л, т. е. на 60,5 %.

Значения выпадений серы, азота и суммы ионов заметно отличаются от соответствующих значений за 2007 г. (табл. 4) (Сви-стов и др., 2008). Превышение суммы осадков на станциях ГСА в 2008 г по сравнению с прошлым годом составляло в среднем 20 %, однако распределялось неравномерно. Возрастание количества осадков привело к увеличению выпадения серы на 20% и суммы ионов на 10 %. Содержание в выпадениях азота суммарного уменьшилось на 20 % при сохранении отношения содержания азота аммиачного к содержанию азота нитратного. В результате отношение выпадений серы и азота увеличилось на 60 %.

Таблица 4

Выпадение серы, азота и суммы ионов на станциях фонового уровня в 2008 г.

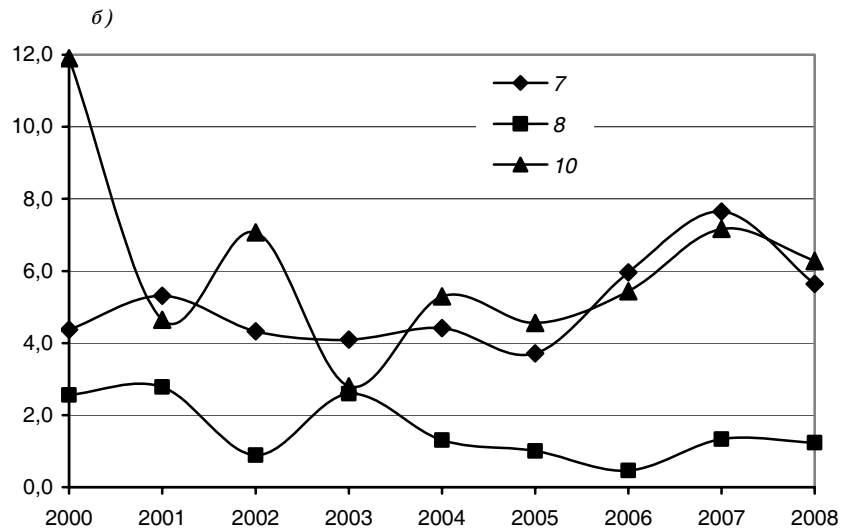
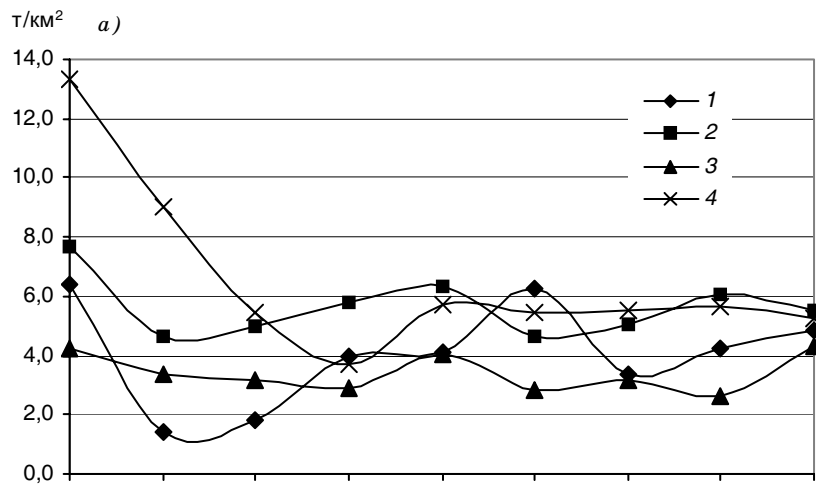
| Станция               | Сумма осадков, мм | Выпадения, т/(км <sup>2</sup> ·год) |                     |                     |      |      | N(NH <sub>4</sub> )/N(NO <sub>3</sub> ) | S(SO <sub>4</sub> )/ΣN |
|-----------------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|------|------|---|------------------------|
|                       |                   | S(SO <sub>4</sub> )                 | N(NO <sub>3</sub> ) | N(NH <sub>4</sub> ) | ΣN   | M    |   |                        |
| Усть-Вымь             | 702,4             | 0,4                                 | 0,15                | 0,21                | 0,36 | 4,9  | 1,4                                     | 1,0                    |
| Воейково              | 831,3             | 0,5                                 | 0,27                | 0,30                | 0,57 | 5,5  | 1,1                                     | 1,0                    |
| Приокско-Террасный БЗ | 765,3             | 0,3                                 | 0,18                | 0,13                | 0,31 | 4,3  | 0,7                                     | 1,0                    |
| Воронежский БЗ        | 442,6             | 0,4                                 | 0,23                | 0,22                | 0,45 | 5,3  | 1,0                                     | 1,0                    |
| Кавказский БЗ         | 1722,7            | 1,0                                 | 0,34                | 0,16                | 0,50 | 16,1 | 0,5                                     | 2,0                    |
| Шаджатмаз             | 631,9             | 0,3                                 | 0,13                | 0,15                | 0,28 | 5,5  | 1,1                                     | 1,2                    |
| Туруханск             | 593,4             | 0,3                                 | 0,09                | 0,22                | 0,31 | 5,6  | 2,3                                     | 1,1                    |
| Хужир                 | 222,5             | 0,1                                 | 0,02                | 0,05                | 0,07 | 1,2  | 2,3                                     | 1,6                    |
| Хамар-Дабан           | 1810,4            | 2,0                                 | 0,19                | 0,71                | 0,91 | 29,9 | 3,7                                     | 2,2                    |
| Терней                | 1376,4            | 0,8                                 | 0,22                | 0,27                | 0,49 | 6,3  | 1,2                                     | 1,7                    |

На рис. 2—4 приводится временной ход изменений величины среднегодовых выпадений с осадками суммы ионов, серы и гидрокарбонатов. Распределение данных по зонам дает некоторое представление о характере влияния физико-географических и климатических условий на качественный и количественный ХСО за последние девять лет. Судя по этим рисункам, произошли изменения по сравнению с 2007 г. содержания компонентов в осадках на станции Кавказский БЗ (Красная Поляна). Увеличение содержания сульфатов (на 40 %), гидрокарбонатов (в пять раз) и кальция (в два раза) вызвано, по-видимому, строительными работами в этом районе в связи с подготовкой к зимней Олимпиаде «Сочи-2014».

Интервал значений суммарных выпадений наиболее широк на горных станциях, где он изменялся за весь период от 5,2 т/(км<sup>2</sup>·год) (Шаджатмаз, 2005 г.) до 30,4 т/(км<sup>2</sup>·год) (Хамар-Дабан, 2003 г.). На ЕЧР этот показатель составляет от 1,4 т/(км<sup>2</sup>·год) (Усть-Вымь, 2001 г.) до 13,3 т/(км<sup>2</sup>·год) (Воронежский БЗ, 2003 г.), а на АЧР от 0,5 до 11,9 т/(км<sup>2</sup>·год) (Хужир, 2006 г. и Терней, 2000 г.).

Ход выпадений веществ с осадками за рассматриваемый сравнительно короткий период для большинства компонентов не показывает каких-либо направленных изменений со временем. Выпадения по периодам распределились следующим образом: в 2000—2004 гг. суммарные выпадения по регионам составляли от 5,4 т/км<sup>2</sup> (АЧР) до 6,0 и 15,1 т/км<sup>2</sup> (ЕЧР и горные станции). В 2005—2008 гг. суммарные выпадения повсеместно понизились до 4,3, 4,7 и 15,0 т/км<sup>2</sup> соответственно. В среднем же по всем регионам уменьшение суммарных выпадений не превышало 10 %. Уменьшение выпадений серы, гидрокарбонатов, азота нитратного и натрия укладывается в интервал 4—10 %, а хлоридов, азота аммонийного и калия более заметно (от 22 до 37 %).

Представляет интерес рассмотреть поведение выпадений после 2002 г. Выраженная особенность выпадений хлоридов, которая распространяется на все регионы, заключается в том, что после 2002 г. в 95 % случаев они не выходят за пределы 0,1—1,0 т/(км<sup>2</sup>·год). Выпадения хлоридов более всего колеблются на АЧР и в горных районах.





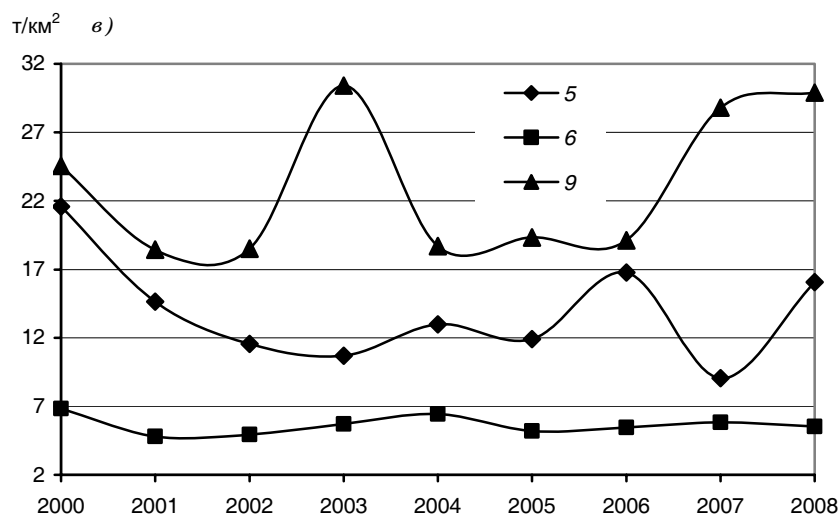
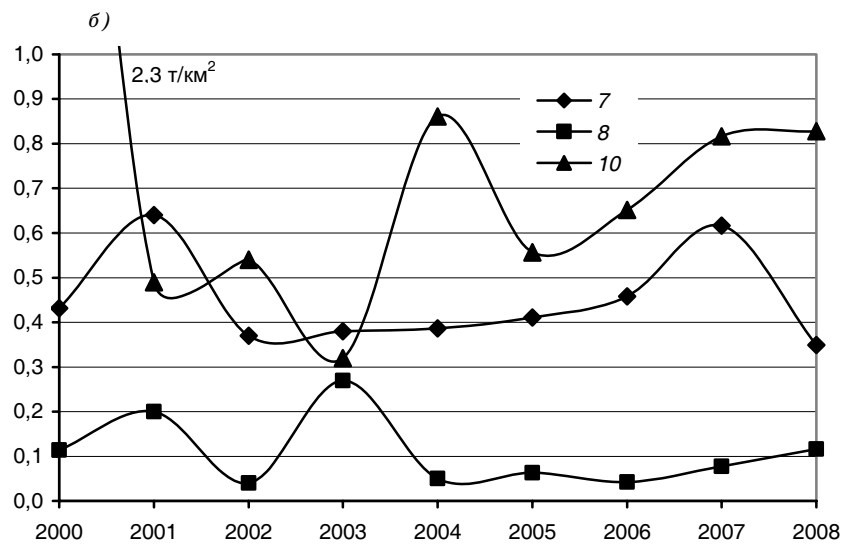
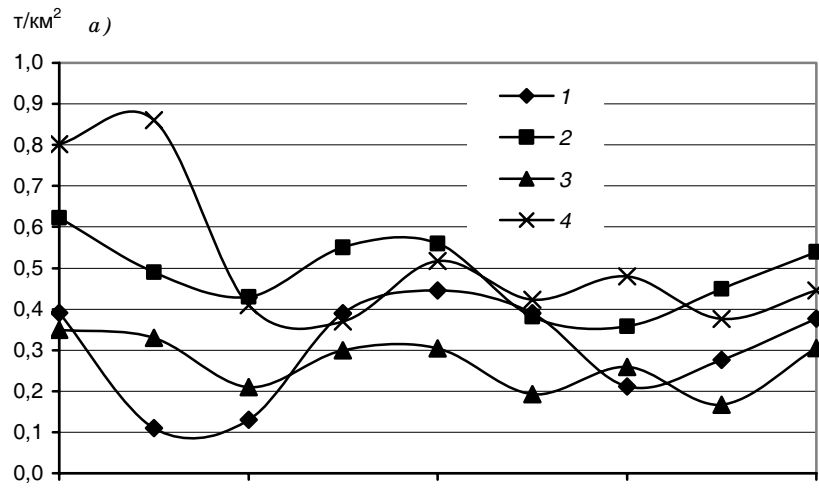


Рис. 2. Влажные выпадения суммы ионов на фоновых станциях в 2000—2008 гг.

1 — Усть-Вымь, 2 — Воейково, 3 — Приокско-Террасный БЗ, 4 — Воронежский БЗ, 5 — Кавказский БЗ, 6 — Шаджатмаз, 7 — Туруханск, 8 — Хужир, 9 — Хамар-Дабан, 10 — Терней.

*a* — европейская часть России, *б* — азиатская часть России, *в* — горные станции.

Наименьшие колебания величины выпадений почти всех компонентов характерны для ЕЧР, где они составляют от  $0,2 \text{ т/км}^2$  (хлориды, азот суммарный) до  $1,8 \text{ т/км}^2$  (гидрокарбонаты). Соответствующие значения выпадений серы и катионов находятся в указанных пределах. Разброс выпадений по АЧР более высокий: от  $0,1 \text{ т/км}^2$  (азот суммарный, сера, хлориды) до  $2,7 \text{ т/км}^2$  (гидрокарбонаты), а на горных станциях самый большой: от  $0,3 \text{ т/км}^2$  (сера, хлориды, азот суммарный) до  $18,8 \text{ т/км}^2$  (гидрокарбонаты).



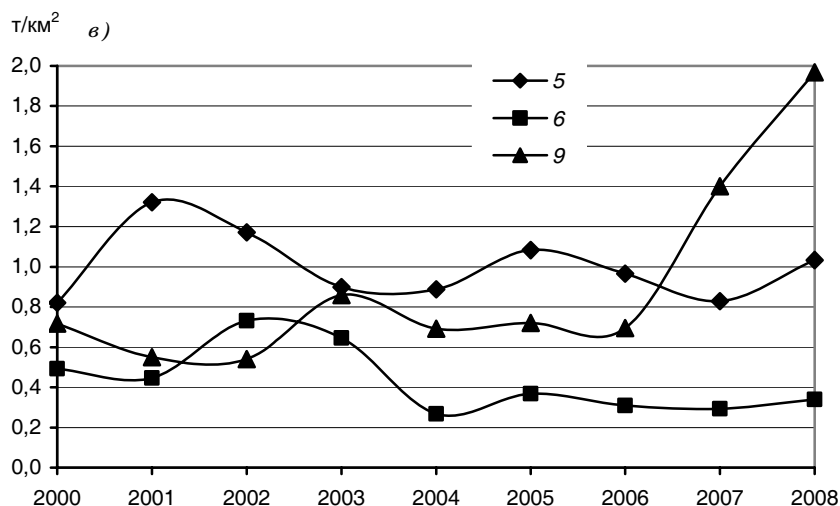
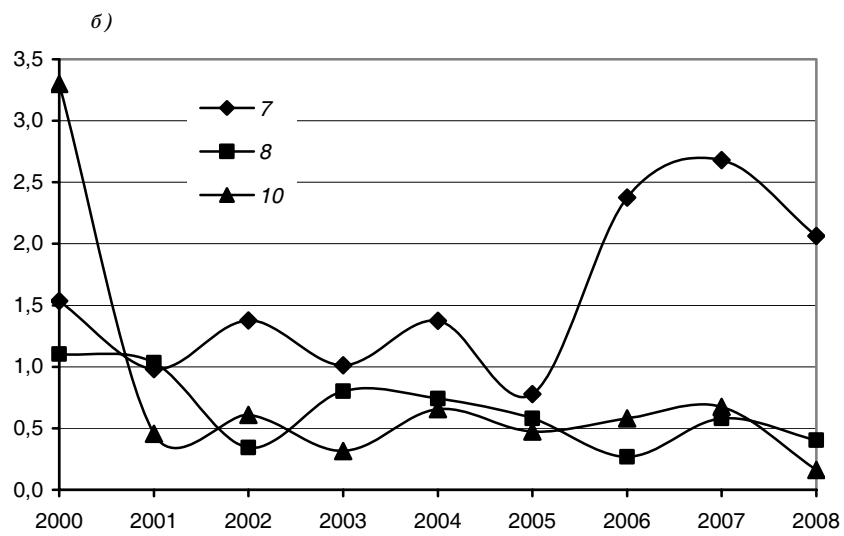
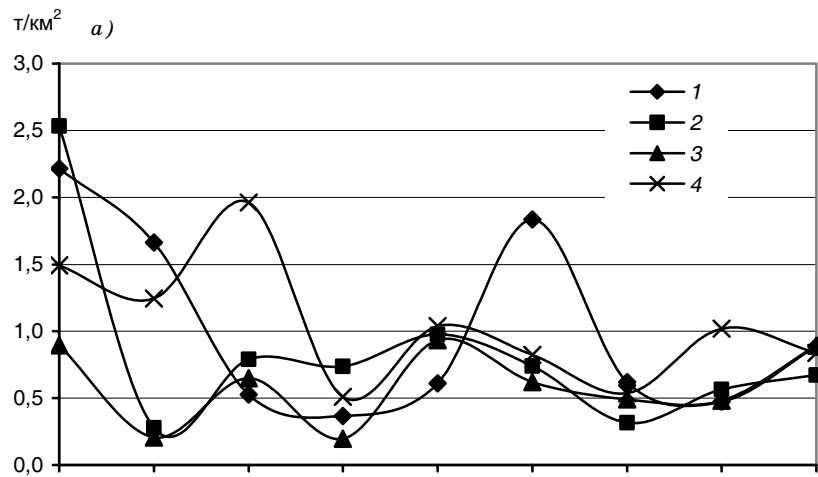


Рис. 3. Влажные выпадения серы на фоновых станциях в 2000—2008 гг. 1 — Усть-Вымь, 2 — Воейково, 3 — Приокско-Террасный БЗ, 4 — Воронежский БЗ, 5 — Кавказский БЗ, 6 — Шаджатмаз, 7 — Туруханск, 8 — Хужир, 9 — Хамар-Дабан, 10 — Терней. а — европейская часть России, б — азиатская часть России, в — горные станции.

Кислотность осадков и количество кислых компонентов в выпадениях на ЕЧР и АЧР за 2008 г. примерно соответствуют уровню предшествующего года. В среднем значение рН осадков по РФ было близко к 6,0 с абсолютным минимумом 4,1 и максимумом 6,2.

За период с 2001 по 2008 г. средние значения рН распределялись по регионам следующим образом: 4,6 на ЕЧР, 4,9 на АЧР и 5,3 в осадках горных станций. Если эти значения выразить в единицах кислотности ( $H^+$  мкг/л), то получим, что в каждом регионе колебания ее происходят в пределах от полутора до почти трех порядков величины. Доля результатов измерений осадков с  $pH \leq 5,0$  ( $H^+ \geq 10$  мкг/л) не превышает 15 % общего числа измерений (более 1500).



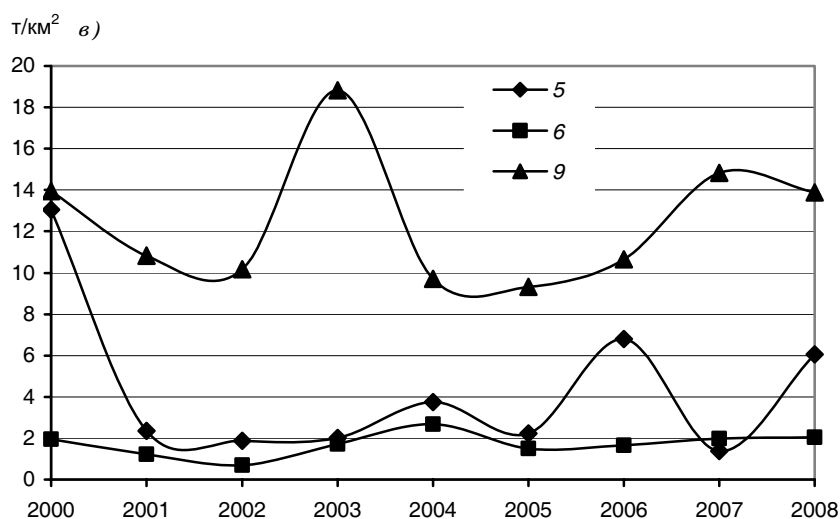
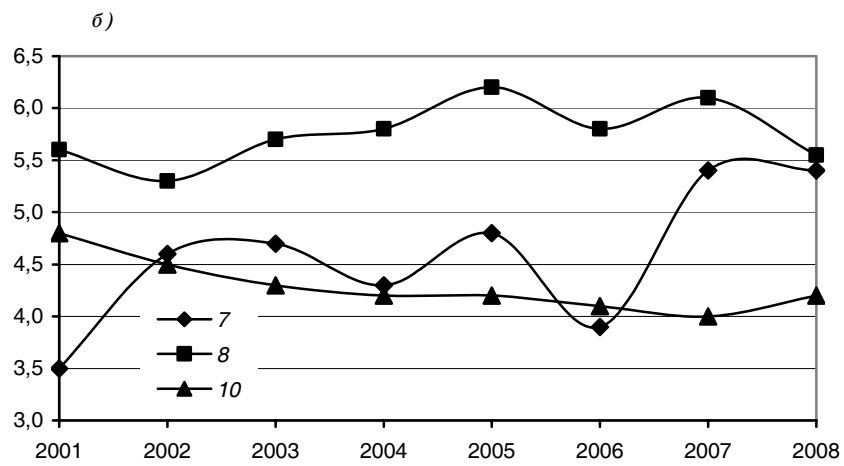
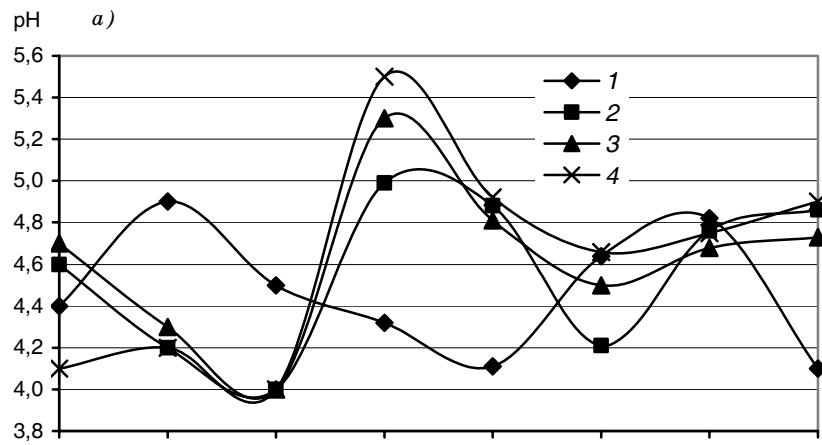


Рис. 4. Влажные выпадения гидрокарбонатов на фоновых станциях в 2000—2008 гг.

1 — Усть-Вымь, 2 — Воейково, 3 — Приокско-Террасный БЗ, 4 — Воронежский БЗ, 5 — Кавказский БЗ, 6 — Шаджатмаз, 7 — Туруханск, 8 — Хужир, 9 — Хамар-Дабан, 10 — Терней.

*a* — европейская часть России, *б* — азиатская часть России, *в* — горные станции.

На рис. 5 приводятся сведения об изменениях со временем абсолютных минимальных значений рН. Наиболее устойчиво максимальная кислотность сохраняется в Тернее, где за весь указанный период она изменялась от 16 до 100 мкг/л (рН = 4,8...4,0). На всех других станциях верхний предел рН превышает 5,0. Наибольший размах кислотности отмечен в осадках Туруханска: 4 — 316 мкг/л (рН = 5,4...3,5). На станциях ЕЧР и АЧР нижний предел рН обычно близок к 4,0. Для горных станций с 2001 г. не отмечено ни одного случая, чтобы кислотность осадков превышала 32 мкг/л (рН = 4,5).



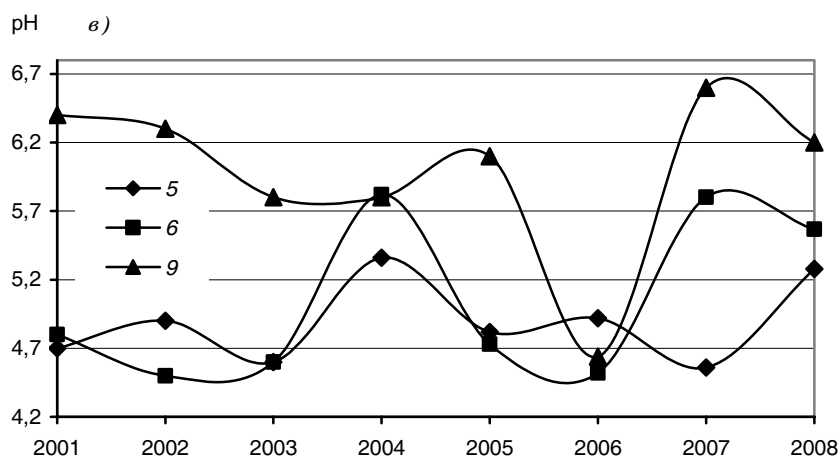


Рис. 5. Абсолютная минимальная величина рН на фоновых станциях РФ в 2001—2008 гг.

1 — Усть-Вымь, 2 — Воейково, 3 — Приокско-Террасный БЗ, 4 — Воронежский БЗ, 5 — Кавказский БЗ, 6 — Шаджатмаз, 7 — Туруханск, 8 — Хужир, 9 — Хамар-Дабан, 10 — Терней.

*a* — европейская часть России, *б* — азиатская часть России, *в* — горные станции.

В заключение приведем данные о ходе и колебаниях величины выпадений сульфатов и нитратов в осадках на двух фоновых станциях (Кавказский БЗ и Туруханск), расположенных в различных физико-географических районах (рис. 6 и 7). Временной интервал охватывает 27 лет, в течение которых в хозяйственной деятельности РФ произошли заметные изменения. Опираясь только на приведенные материалы, можно сказать, что выбросы оксидов азота и серы в районе Туруханска остались практически неизменными. В Кавказском БЗ поступление сульфатов с осадками уменьшилось примерно вдвое, нитратов возросло с 0,5 до 1,5 т/км<sup>2</sup>.

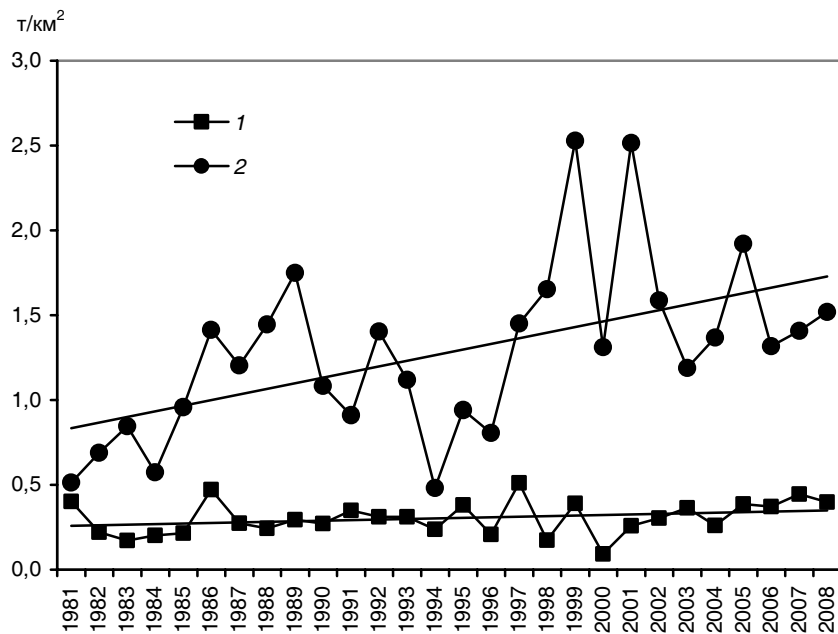


Рис. 6. Выпадения нитратов с атмосферными осадками на российских станциях ГСА ВМО Туруханск (1) и Кавказский БЗ (2) в период 1981—2008 гг.

Сопоставление приведенных данных с результатами измерений на других фоновых и региональных станциях подтверждает постепенное уменьшение содержания в атмосфере над ЕЧР оксидов серы и возрастание содержания оксидов азота.

На всей континентальной части АЧР главным источником получения энергии до сих пор остается сжигание местного угля с высоким содержанием серы. Средний уровень загрязнения воздуха соединениями серы здесь остается более постоянным.



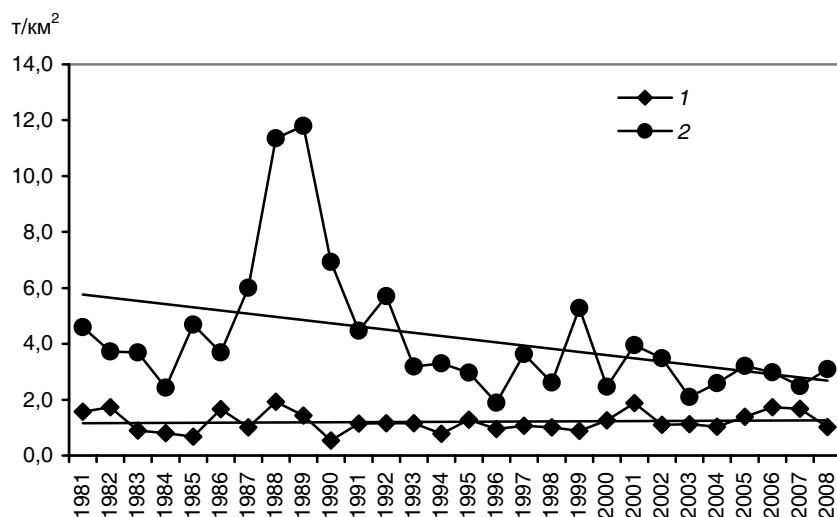


Рис. 7. Выпадения сульфатов с атмосферными осадками на российских станциях ГСА ВМО Туруханск (1) и Кавказский БЗ (2) в период 1981—2008 гг.

По-видимому, из-за небольшой плотности населения на территории АЧР выбросы соединений азота здесь меньше, чем на ЕЧР, и поэтому увеличение выпадения нитратов выражено слабее. Более высокие выпадения обоих компонентов в Кавказском БЗ объясняются обилием здесь осадков, сумма которых в 2—2,5 раза больше, чем в Туруханске.

#### *Обсуждение результатов*

Химический состав атмосферных осадков отражает все основные уровни круговорота веществ в природе: глобальный, региональный и локальный. Глобальный уровень объединяет ландшафтно-географические зоны и поступление на сушу цикличе-

ских солей, региональный — включает в себя осадки в природных и экономико-географических регионах. Локальный — это города и промышленные центры.

Для осадков, выпавших в 1996—2008 гг., характерна малая (32 % проб) и средняя (26 % проб) минерализация. Повышенная минерализация зарегистрирована примерно в 20 % проб. Эти соотношения от года к году изменяются.

На рис. 8 показано изменение со временем региональной фоновой минерализации ( $M \leq 15$  мг/л) по сравнению с изменением повторяемости двух других градаций суммы ионов, обусловленных локальными источниками загрязнения воздуха. В последние 5 лет доля наиболее чистых осадков изменяется в пределах 20 %. Вообще же, размах изменений суммы ионов в осадках колеблется от 0,34 до 500 мг/л, охватывая, таким образом, большую часть минерализации пресных природных вод суши (минерализация озер Байкала и Ладожского близка к 90 мг/л).

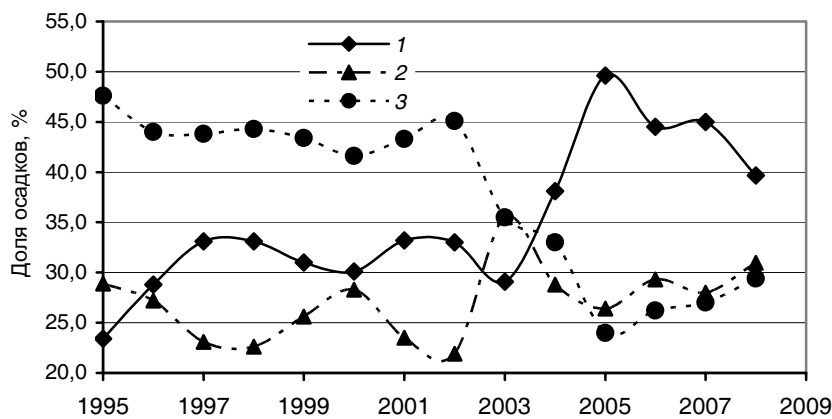


Рис. 8. Изменение минерализации осадков по трем ее градациям за период 1995—2008 гг.

1)  $M \leq 15$  мг/л, 2)  $15 \text{ мг/л} < M \leq 30$  мг/л, 3)  $M \geq 30$  мг/л.

При обычных для атмосферы температурах минимально возможная минерализация осадков в присутствии  $\text{CO}_2$  воздуха не может быть меньше 0,3 мг/л. Следовательно, образование облачных элементов происходит как бы при отсутствии аэрозолей в качестве ядер конденсации, что практически невозможно. Свойства жидкой воды проявляются при объединении примерно 200 молекул пара, вероятность одновременного столкновения и сближения которых ничтожно мала. Поэтому приходится допустить, что в атмосферном воздухе постоянно присутствуют частицы, которые выполняют роль аккумулятора молекул пара при столкновении последних и удерживают их до тех пор, пока не произойдет конденсация в истинном смысле этого слова. Общепринятые представления о природе ядер конденсации расходятся, по меньшей мере, с двумя экспериментальными фактами: выпадением осадков, минерализация которых полностью определяется содержанием углекислого газа в воздухе, и присутствием в облаках капель, переохлажденных до  $-70^\circ\text{C}$ .

Современная теория объясняет поведение воды, водных растворов и коллоидных систем бесконечным многообразием их геометрической и энергетической структуры. Возможно, именно этим определяются тонкие свойства воды, коллоидов и растворов — свойства, давно известные технологам, гидрологам и биологам. Можно вспомнить также забытую гипотезу Я. И. Френкеля о фотохимическом механизме возникновения ядер конденсации в земной атмосфере, приняв которую, можно сразу устранить оба противоречия (Френкель, 1953).

Концентрация отдельных компонентов в осадках еще более, чем их минерализация, изменчива в пространстве и во времени. Почти в 11 % единичных проб на станциях фоновом уровня содержание одного из анионов или катионов равно нулю. Это обстоятельство следует рассматривать не только как свидетельство неоднородности их распределения в атмосфере, но и как показатель различной способности осадков вбирать весьма значительные количества разнообразных соединений. Можно предполагать, что в глобальном масштабе они не накапливаются в атмо-

сфере, и имеет место сбалансированное состояние в отношении этих примесей. Интервал суммы ионов 1—3 мг/л соответствует абсолютным минимальным значениям минерализации осадков на большинстве станций фонового уровня. Этот вывод не может относиться к осадкам регионального и локального уровней. Очевидно, в промышленных городах и целых промышленных районах антропогенный вклад становится преобладающим. Насколько эффективен при этом процесс вымывания, например, серы и азота, предстоит разобраться в будущем.

### Выводы

- Абсолютный минимум суммы ионов в атмосферных осадках равен 0,3 мг/л с максимальными значениями 3,0—3,5 мг/л. Химический состав таких осадков может быть принят в качестве межрегионального (возможно, глобального) фонового уровня. Глобальный фоновый состав осадков слабо зависит от влияния подстилающей поверхности и определяется главным образом микрофизическими процессами при образовании облаков.

- Диапазон минерализации 3—7 мг/л можно принять за региональный фоновый состав осадков с верхним пределом до 15 мг/л. Качественный и количественный состав этих осадков определяется природной зоной. Минерализация единичных, недельных или декадных осадков, постоянно превышающая уровень 15 мг/л, означает, что воздух настолько загрязнен посторонними примесями, что осадки не справляются с функцией его очищения.

- Качественный состав суммы ионов определяется сульфатами и гидрокарбонатами, которые вместе составляли около 50 % суммы ионов.

- Больше всего кислых осадков (до  $pH = 3,0$ ) выпадает на ЕЧР, где абсолютные минимальные значения  $pH$  чаще всего ниже равновесного значения ( $pH = 5,6$ ). На АЧР тоже могут выпадать осадки с  $pH < 4,0$  (в Тернее и реже в Туруханске). В последние два года наблюдается увеличение  $pH$  в Туруханске и Хужире. В Сихотэ-Алинском БЗ заметен устойчивый тренд возрастания кислотности осадков.

- Наиболее значительные количества карбонатов поступают с осадками в горных районах, и связано это не только с запыленностью воздуха, но и с большим количеством выпадающих здесь осадков.

- Существенное загрязнение осадков в последние годы на станции Кавказский БЗ, по-видимому, связано с работами по подготовке к зимней Олимпиаде «Сочи-2014».

- На станциях ГСА в 70 % случаев выпадения осадков суммарного азота выпадает в 1,4 раза больше, чем серы, тогда как в 1958—1975 гг. это соотношение составляло 0,4—0,5. По сравнению с серединой прошлого века относительное содержание серы уменьшилось примерно в 3 раза.

- Основная масса азота (так же как и 40 лет назад) поступает на подстилающую поверхность в виде аммонийных солей.

- На равнинных станциях фоновый уровень пространственные и межгодовые отклонения выпадений суммы ионов изменяются в пределах 3—5 т/(км<sup>2</sup>·год).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Селезнева Е. С., 1978. О постановке исследований фоновых характеристик загрязнения атмосферы. — Метеорология и гидрология, № 1, с. 40—47.

Селезнева Е. С., 1980. Фоновые характеристики химического состава атмосферных осадков как критерии для размещения станций глобального мониторинга. — В кн.: Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды. Труды Международного симпозиума, Рига, 12—15 декабря 1978 г., с. 205—208.

Селезнева Е. С., Петренчук О. П., Свистов П. Ф., 1968. О распределении и химическом составе естественных аэрозолей над разными районами Европейской территории СССР. — Труды ГГО, вып. 234, с. 125—130.

Свистов П. Ф., Першина Н. А., Полищук А. И., 2006. Ежегодные данные по химическому составу атмосферных осадков за 1996—2000 гг. (Обзор данных). — М.: Метеоагентство Росгидромета. — 226 с.

Свистов П. Ф., Першина Н. А., Полищук А. И., 2007. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2006 г. — М.: Росгидромет. ВекторТис, с. 41—43.

Свистов П. Ф., Першина Н. А., Полищук А. И., 2008. Обзор загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2007 г. — М.: Метеоагентство Росгидромета, с. 45—47.

Френкель Я. И., 1953. О фотохимическом механизме возникновения ядер конденсации в земной атмосфере. — Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 2, с. 191—192.

Юнге Х., 1965. Химический состав и радиоактивность атмосферы. — М.: Мир. — 353 с.

Strategy for implementation of the Global Atmosphere Watch Programme (2001—2007) (WMO/GAW Report #142).

WMO/GAW Strategic Plan: 2008—2015. A contribution to the implementation of the WMO Strategic Plan 2008—2011 (WMO, GAW, No. 172, TD No. 1384).

УДК 551.051.051

**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ  
ПОВЕРХНОСТИ**

*Г. Г. Щукин, В. Д. Степаненко, С. П. Образцов, Д. М. Караваев,  
В. Ю. Жуков, Ю. В. Рыбаков*

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

Поступила в редакцию 04.05.2009

**Введение**

Радиофизические методы исследования природной среды включают методы метеорологической радиолокации, СВЧ-радиометрии и других наземных и спутниковых средств дистанционного зондирования. Радиофизические методы дистанционного зондирования основанные на измерении и интерпретации характеристик электромагнитных полей, которые определенным образом связаны с метеорологическими параметрами, позволяют оперативно получать информацию о физическом состоянии атмосферы и протекающих в ней процессах. В последнее время радиофизические исследования атмосферы в ГГО проводились в нескольких направлениях:

1) теоретические исследования переноса микроволнового излучения в атмосфере, разработка СВЧ-радиометрических методов определения температурно-влажностных характеристик атмосферы и подстилающей поверхности;

2) разработка методов и аппаратуры СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы, облаков, подстилающей поверхности и экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков с помощью наземных СВЧ-радиометров;

3) развитие перспективных технических средств, методов интерпретации и использования метеорологической информации об

облаках и связанных с ними опасных явлений на основе доплеровских радиолокаторов с поляризационной селекцией сигналов, оснащенных СВЧ-радиометрами.

Ниже приводятся основные результаты работ, выполненных в подразделениях Филиала ГУ «ГГО» за последние 10 лет и связанных с развитием и применением радиофизических методов исследований для решения задач метеорологии.

#### **Теоретические исследования СВЧ-радиометрического метода восстановления параметров атмосферы и подстилающей поверхности**

В последнее десятилетие теоретические исследования развивались в нескольких направлениях с целью разработки дистанционных методов определения метеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности по собственному радиотепловому излучению атмосферы с помощью спутниковых и наземных систем (Образцов, Щукин, 2001, 2004, 2006). Разработана физико-математическая модель дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности, которая включает следующие основные блоки: а) радиационную модель атмосферы и подстилающей поверхности (коэффициенты поглощения атмосферных газов, облаков, осадков, излучательная способность различных типов поверхностей); б) численные алгоритмы расчета интенсивности микроволнового излучения атмосферы и поверхности и его вариационных производных; в) методы и алгоритмы решения нелинейных обратных задач; г) модели атмосферы, облаков и подстилающей поверхности (априорная статистическая информация о распределении метеопараметров атмосферы, поверхности).

Моделирование поля микроволнового излучения выполнялось на основе векторного уравнения переноса (УП) радиотеплового излучения, позволяющего проводить модельные расчеты излучения системы поверхность Земли—атмосфера с учетом поляризации (Степаненко, 1987). В общем виде УП в атмосфере, записанное относительно вектора-параметра Стокса ( $\vec{S}$ ) имеет вид:



$$\frac{d\vec{S}(\vec{w}, x, y, z)}{dl} = -\hat{C}(\vec{w}, x, y, z)\vec{S}(w, x, y, z) + \int_{4\pi} \hat{B}(\vec{w}, \vec{w}', x, y, z)\vec{S}(\vec{w}, x, y, z)dw + \vec{G}(\vec{w}, x, y, z), \quad (1)$$

где производная по расстоянию берется вдоль направления распространения излучения  $\vec{w}$ ;  $\hat{C}(\vec{w}, x, y, z)$  и  $\hat{B}(\vec{w}, \vec{w}', x, y, z)$  — полные матрицы ослабления излучения вдоль выбранного направления  $\vec{w}$  и рассеяния из направления  $\vec{w}'$  в направление  $\vec{w}$ .

Из четырех компонентов вектора-параметра Стокса при решении частных задач дистанционного зондирования рассматривались только два первых компонента — вертикально и горизонтально поляризованные составляющие; полагалось, что третий и четвертый компоненты вектора-параметра Стокса равны нулю. Поскольку поле радиотеплового излучения слабо зависит от вида индикатрисы рассеяния, для горизонтально однородной атмосферы в предположении азимутально-симметричной шероховатости и диффузности поверхности использовано упрощенное векторное уравнение переноса.

В общем случае для моделирования ослабления в капельных облаках и осадках используется теория Ми расчета ослабления сферических частиц и их интегрирование по размерам с учетом распределения частиц по размерам. При описании ослабления микроволн жидкокапельными недождевыми облаками (As, Cu, Ac, Sc и др.), для которых максимальный размер частиц не превышает 100 мкм, справедливо рэлеевское приближение, поэтому определение их оптических свойств связано в основном с определением их диэлектрической проницаемости. Для учета поглощения микроволнового излучения в водяном паре и кислороде используются традиционные алгоритмы.

Численное моделирование уходящего (отраженного солнечного, собственного теплового) излучения видимого и в ИК-диапазоне волн выполнялось с учетом селективного поглощения газовых

компонентов атмосферы, континуального поглощения водяного пара, влияния аэрозольного компонента, а также эффектов многократного рассеяния.

Подстилающая поверхность характеризуется большим разнообразием типов и изменчивостью параметров ее состояния, поэтому с учетом реальных возможностей корректной обработки спутниковой информации при моделировании рассматривался ограниченный набор типов подстилающей поверхности: водная поверхность, открытые песчано-глинистые почвы, почвы с травяным покровом (степи, с/х угодья), лесные массивы, снежно-ледяные покровы.

Для решения уравнения (1) — обратной задачи определения метеопараметров атмосферы (профилей температуры, влажности и водозапаса облаков) и подстилающей поверхности (температура, влажность, скорость приводного ветра) — использовался метод статистической регуляризации, который для линейного приближения, связывающего вариации радиояркой температуры ( $\delta Y$ ) с вариациями метеопараметров ( $\delta X$ ), дает решение в виде

$$\delta X = (A^T I^{-1} A + K^{-1})^{-1} A^T I^{-1} \delta Y,$$

где  $A$  — линейный оператор прямой задачи,  $I$  — ковариационная матрица ошибок измерений,  $K$  — ковариационная матрица искоемых параметров,  $\delta$  — вектор ошибок измерений.

Выполнен выбор оптимального набора радиометрических каналов для решения задач комплексного температурно-влажностного зондирования атмосферы с поверхности Земли и обоснован вариант семиканальной схемы измерений для области спектра 18—90 ГГц. Алгоритм восстановления профилей температуры, влажности, водности тропосферы использует априорную информацию о профилях температуры, давления, влажности, водности облаков, полученную из результатов самолетного и радиозондирования в Северо-Западном регионе. Вектор измеряемых параметров включает измерения радиоярких температур, приземные метеопараметры (температура, влажность), радиолокационные данные об отражаемости и другую метеоинформацию. Для исключения влияния нелинейности применен итерационный алгоритм.

Предлагаемая схема эксперимента позволяет на различных высотных уровнях в три и более раз уменьшить первоначальную неопределенность значений метеопараметров: погрешность определения профилей температуры составляет около 0,5 К в приземном слое атмосферы и увеличивается до 1,5—2,0 К в верхней тропосфере, погрешность определения влажности составляет около 10 % в нижних слоях тропосферы и увеличивается до 20—30 % в верхней тропосфере.

Также решалась задача определения метеопараметров атмосферы и подстилающей поверхности по результатам дистанционного зондирования в СВЧ, ИК и видимом диапазоне из космоса (Образцов, Щукин, 2004). Численные эксперименты были направлены на анализ весовых функций, характеризующих чувствительность уходящего излучения к вариациям метеопараметров при различных высотах для реализованных радиометрических каналов.

На рис. 1 приведен пример весовых функций температуры для частотных каналов радиометра МВТЗА, работающих в области линии поглощения кислорода 60 ГГц (условия: безоблачная атмосфера с влагозапасом 18,6 кг/м<sup>2</sup>, поросшая травой почва). Видно, что использование дополнительного блока спектральных каналов на частотах около 57 ГГц позволяет поднять потолок зондирования температуры атмосферы от 20 до 50 км.

На рис. 2 и 3 приведены весовые функции влажности и водности соответственно для частотных каналов радиометра МТВЗА-ГЯ. Из рис. 2 видно, что весовые функции влажности расположены в основном в тропосфере и не имеют ярко выраженных максимумов. При изменении влажности воздуха на 1 г/кг в километровом слое вариации радиоярких температур не превышают 0,8 К. Особенности вертикального хода весовых функций позволяют выделить по высоте три области: 0—3, 3—7, 7—14 км.

Из рис. 3 видно, что весовые функции водности могут иметь сложный характер как по спектру, так и по высоте. Величина водности существенно влияет на радиояркую температуру, причем при увеличении водности может происходить как увеличение, так и уменьшение радиояркой температуры.

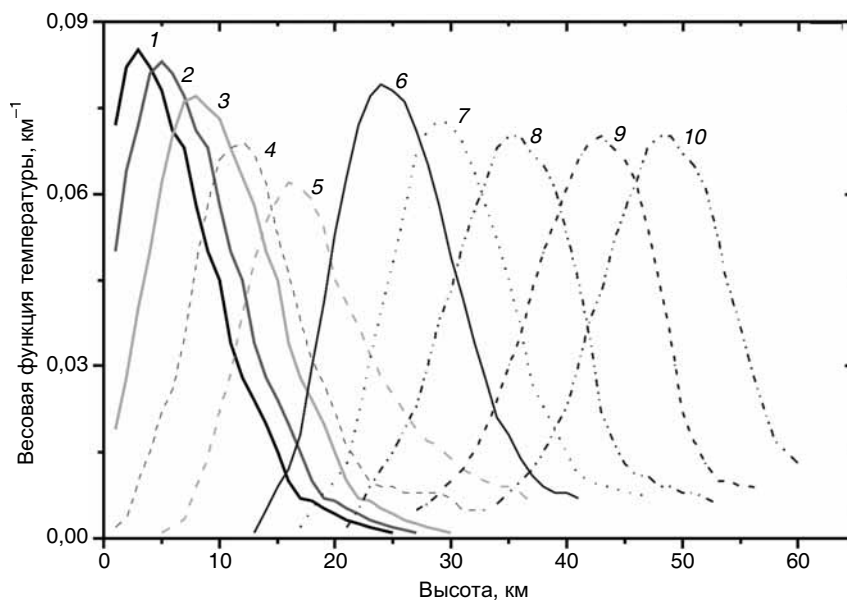


Рис. 1. Весовые функции температуры для частотных каналов температурного зондирования МТВЗА (над сушей).

|                          |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Кривая .....             | 1    | 2    | 3    | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Частотный канал, ГГц.... | 52,8 | 53,3 | 53,8 | 54,64 | 55,63 | 57,19 | 57,24 | 57,27 | 57,28 | 57,29 |

Выполнены исследование и сравнение информативности различных спутниковых радиометров: МТВЗА-ГЯ (Метеор-М), МТВЗА-ОК (СИЧ-1М), AMSU (NOAA 15—17), работающих в частотном диапазоне 5—190 ГГц и предназначенных для дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли с целью определения вертикальных профилей влажности, температуры, водозапаса облаков, идентификации и оценки интенсивности осадков, определения температуры поверхности, степени волнения, влажности суши, биомассы растительности.

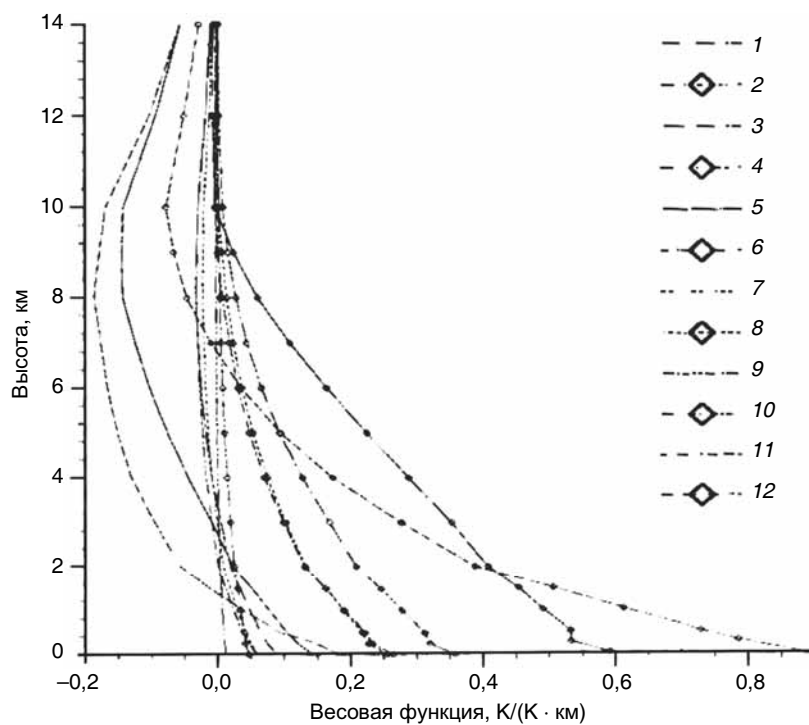


Рис. 2. Весовые функции влажности воздуха для различных частотных каналов радиометра МТВЗА-ГЯ при горизонтальной (Г) и вертикальной (В) поляризации.

|                           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Кривая .....              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11    | 12    |
| Частотный канал, ГГц..... | 10,6 | 10,6 | 18,7 | 18,7 | 23,8 | 23,8 | 31,5 | 31,5 | 42,0 | 42,0 | 91,65 | 91,65 |
| Поляризация.....          | В    | Г    | В    | Г    | В    | Г    | В    | Г    | В    | Г    | В     | Г     |

Численный эксперимент показал, что эффективность восстановления метеопараметров атмосферы существенным образом зависит от типа поверхности и наличия облачности в тропосфере, причем необходимо применять различные алгоритмы анализа состояния поверхности Земли и облачности при интерпретации данных радиометров AMSU (на основе использования данных ИК-радиометров AVHRR и HIRS) и МТВЗА (на основе использова-

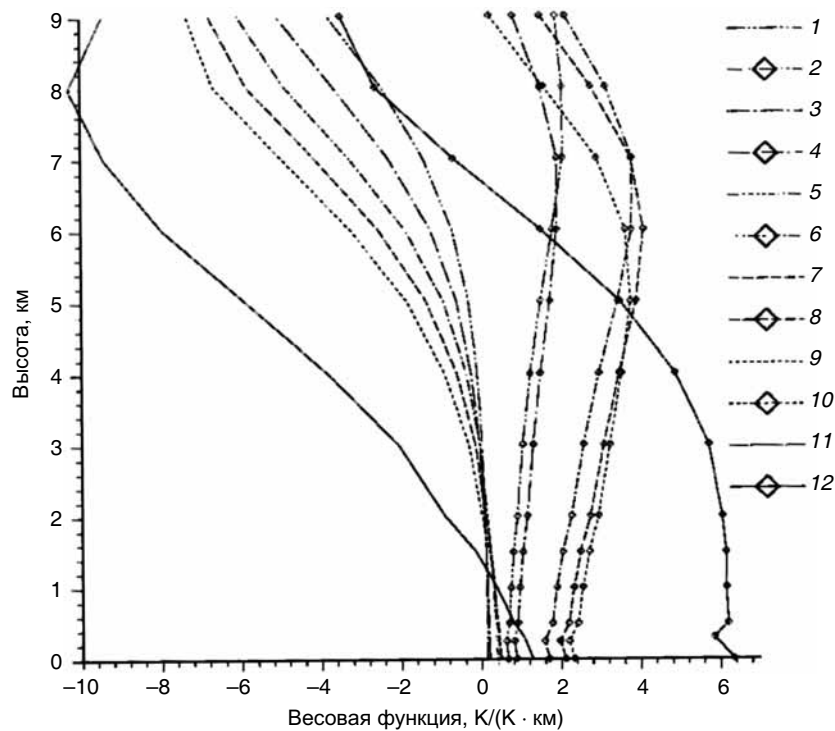


Рис. 3. Весовые функции водности облаков (над сушей) для различных частотных каналов радиометра МТВЗА-ГЯ при горизонтальной (Г) и вертикальной (В) поляризации.

|                           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Кривая .....              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11    | 12    |
| Частотный канал, ГГц..... | 18,7 | 18,7 | 23,8 | 23,8 | 31,5 | 31,5 | 36,7 | 36,7 | 42,0 | 42,0 | 91,65 | 91,65 |
| Поляризация.....          | В    | Г    | В    | Г    | В    | Г    | В    | Г    | В    | Г    | В     | Г     |

ния данных длинноволновых СВЧ-радиометрических каналов, где атмосфера прозрачна). Учет эффектов многократного рассеяния становится существенным на частотах 6—37 ГГц, когда поправка (по сравнению с расчетами в приближении чистого поглощения) составляет от 1 К (при частоте 37 ГГц) до 2 К (при частоте 19 ГГц) и менее 0,2 К на остальных частотах (частота более 42 ГГц и менее 19 ГГц) при интенсивности дождя около 10 мм/ч.

Радиометр AMSU имеет преимущества на высотах 10—20 км, уступая по информативности МТВЗА в тропосфере. Потолок зондирования составляет около 15 км для водяного пара и около 10 км для водности облаков. Эффективность восстановления температуры достигает наибольших значений на высотах 20—45 км, составляя около 50—70 %, причем наличие облачности и тип подстилающей поверхности влияют на эффективность восстановления температуры в основном в тропосфере.

В работе Образцова, Щукина (2001) предложены простые алгоритмы определения температуры поверхности и общего влагосодержания атмосферы на основе интерпретации данных спутникового радиометра высокого разрешения ( $1 \times 1$  км) AVHRR NOAA, работающего на длинах волн около 0,67 и 0,86 мкм (отраженное солнечное излучение) и 3,74, 10,8 и 12 мкм (уходящее собственное излучение). В частности, численное моделирование позволило установить, что для определения температуры подстилающей поверхности с точностью около  $2^\circ\text{C}$  можно использовать следующие соотношения:

для ночных наблюдений

$$T_{\text{п}} = C_1 T_{3.7} + C_2 T_{11} + C_3 T_{12} + C_4,$$

для дневных наблюдений

$$T_{\text{п}} = C_5 T_{11} + C_6 T_{12} + C_7,$$

где  $T_{3.7}, T_{11}, T_{12}$  — измеренные яркостные температуры 3-го, 4-го и 5-го каналов радиометра AVHRR соответственно;  $C_1—C_7$  — эмпирические коэффициенты, определяемые на основе расчетов уходящего теплового излучения для набора моделей атмосферы и подстилающей поверхности.

Пример восстановления температуры поверхности приводится на рис. 4. Данные наземной метеорологической сети представлены на рисунке в виде изолиний, а данные спутниковых измерений температуры поверхности суши и водной поверхности определены в градациях яркости. Из рисунка видно, что наблюдается качественное согласие восстановленных и контактных

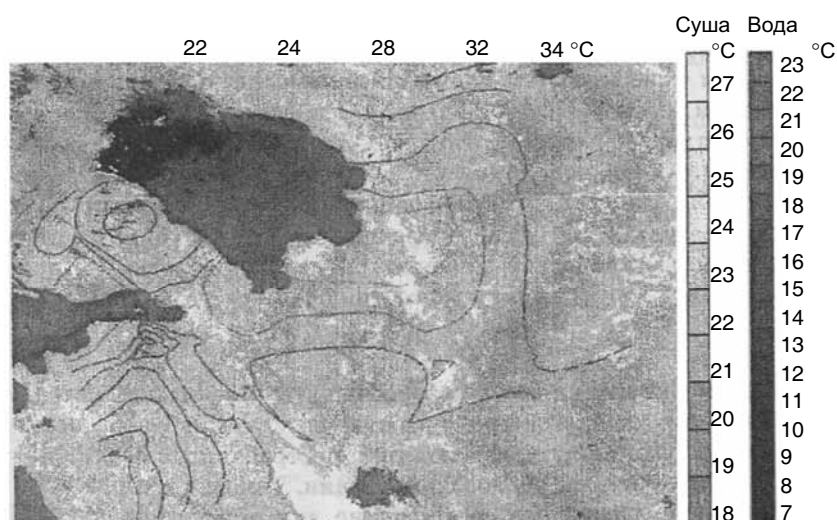


Рис. 4. Сопоставление результатов определения температуры поверхности по спутниковым данным AVHRR NOAA и по данным наземной метеорологической сети.

измерений — области минимальной и максимальной температур примерно совпадают.

Одной из причин различия результатов контактных и дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности является тот факт, что дистанционные измерения получены с усреднением  $1 \times 1$  км, а контактные выполнялись в конкретных пунктах.

Численные эксперименты показывают, что общее влагосодержание атмосферы может быть оценено с относительной погрешностью 5—15 % для атмосферы с влагосодержанием около 20 мм при определенных заметных различиях температуры подстилающей поверхности и атмосферы. В противном случае ошибка заметно возрастает.

Перспективы совершенствования алгоритмов интерпретации спутниковых данных связаны с привлечением априорной метеорологической информации, а также методов валидации спутниковой информации на основе данных независимых наблюдений.



### Исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков с помощью наземных СВЧ-радиометров

СВЧ-радиометрический метод, основанный на регистрации собственного нисходящего теплового излучения атмосферы, позволяет определять интегральные параметры атмосферы: влагозапас атмосферы и водозапас облаков (Степаненко и др., 1987). При этом измерения характеристик радиотеплового излучения атмосферы должны производиться как минимум на двух частотах ( $f_1$  и  $f_2$ ), а влагозапас атмосферы ( $Q$ ) и водозапас облаков ( $W$ ) определяются следующим образом:

$$Q = a_0 + a_1\tau(f_1) + a_2\tau(f_2),$$

$$W = b_0 + b_1\tau(f_1) + b_2\tau(f_2),$$

где  $a_i$  и  $b_i$  — коэффициенты регрессии, полученные по данным радиозондирования атмосферы, эмпирическим моделям облачности.

При метеоусловиях, характерных для Северо-Западного региона России, СВЧ-радиометрическое зондирование атмосферы обычно проводится на частотах вблизи середины линии поглощения водяного пара при частотах 20,5—24,5 ГГц и «окне прозрачности» атмосферы около 36 ГГц. Этот набор частот является оптимальным для решения двухпараметрической задачи определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Теоретическая погрешность определения влагозапаса атмосферы (при отсутствии осадков) составляет около 10 %, а погрешность определения водозапаса облаков — около 30 %.

В течение многих лет регулярно проводились экспериментальные СВЧ-радиометрические исследования атмосферы, направленные на решение следующих задач: отработку технологии длительных измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков; исследование мезомасштабных вариаций водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы в период развития опасных метеорологических явлений; разработку методов интерпретации СВЧ-радиометрической информации в задаче сверхкраткосрочного прогноза облаков, осадков. Важным направлением исследований

являлась разработка новых СВЧ-радиометрических систем для влажностного зондирования атмосферы на основе применения современной элементной базы.

Экспериментальные СВЧ-радиометрические исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков проводились регулярно на полевой экспериментальной базе ГГО в п. Воейково Ленинградской области (Караваев, Щукин, 2004; Щукин, Караваев, 2008а). Эксперименты показали, что применение наземных СВЧ-радиометров особенно эффективно для изучения динамики влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в области атмосферных фронтов, когда влажностные характеристики атмосферы претерпевают значительные изменения за короткий промежуток времени. Экспериментальные исследования, выполненные с помощью СВЧ-радиометрической аппаратуры, позволили изучить особенности пространственно-временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различные сезоны при различных синоптических условиях, оценить реальную погрешность оценки влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, определить согласованность данных о водозапасах слоистых облаков различных форм с эмпирическими моделями.

В качестве примера на рис. 5 приведен временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным СВЧ-радиометрических измерений на частотах 22,2 и 36,5 ГГц в период с 1 по 21 мая 2007 г. в п. Воейково. Из рисунка видно, что влагозапас атмосферы изменялся в широких пределах — от 3,2 до 35 кг/м<sup>2</sup>, среднее значение влагозапаса за период с 1 по 21 мая составляет 11,3 кг/м<sup>2</sup>, а его среднее квадратическое отклонение — 4,77 кг/м<sup>2</sup>. Водозапас облаков, как правило, не превышал 1—1,2 кг/м<sup>2</sup>.

На рисунке также приведены значения влагозапаса атмосферы, полученные по данным радиозондирования в п. Воейково. Из рисунка видно, что значения влагозапаса атмосферы, полученные по данным радиозондирования, согласуются с данными СВЧ-радиометра (средняя квадратическая ошибка составляет 1,03 кг/м<sup>2</sup>). Максимальные значения влагозапаса атмосферы отмечались 14 мая и составляли около 30 кг/м<sup>2</sup>, а вариации влагозапаса в период с 13 по 14 мая превышали 23 кг/м<sup>2</sup>.

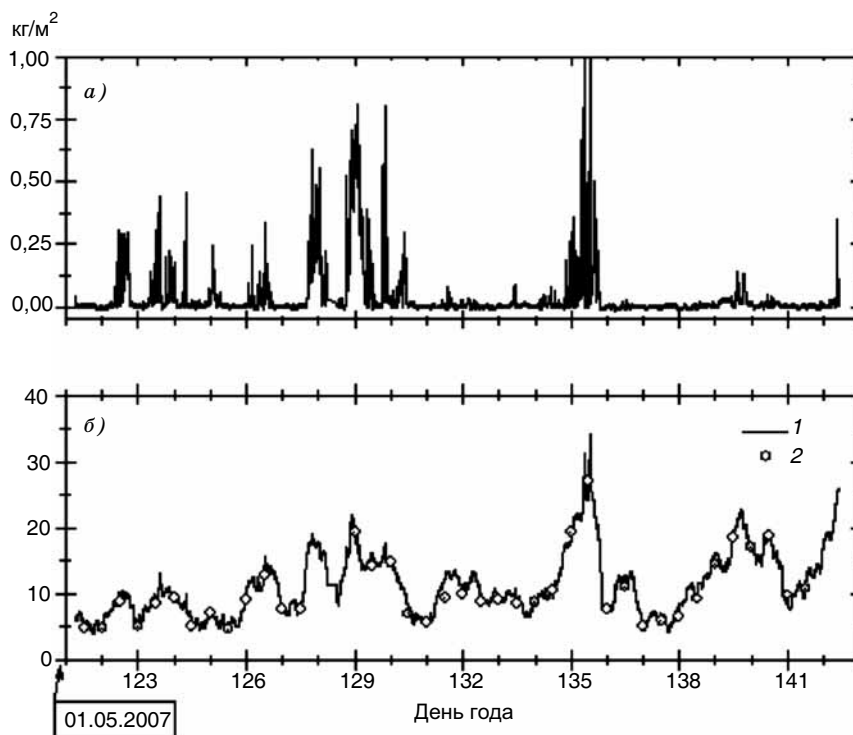


Рис. 5. Временной ход водозапаса облаков (а) и влагозапаса атмосферы (б) по результатам СВЧ-радиометрических измерений в п. Воейково в период 1—21 мая 2007 г.

1 — данные радиометра, 2 — данные радиозонда.

Анализ СВЧ-радиометрических данных показал, что быстрые изменения влагозапаса атмосферы являются отличительным признаком временной изменчивости характеристик влагосодержания атмосферы при прохождении атмосферных фронтов. В области холодных фронтов и фронтов окклюзии в теплый период эти изменения могут превышать  $20 \text{ kg/m}^2$ .

В рамках Балтийского эксперимента продемонстрированы возможности прототипа европейской сети СВЧ-радиометров для наблюдения за облаками (проект CLIWA-NET, 2001—2002 гг.).

Задачей проекта являлось исследование жидкокапельной влаги в облаках в интересах совершенствования параметризации климатических моделей, схем прогноза погоды, развития методов контроля условий обледенения самолетов.

Важной частью проекта являлись эксперименты (Нидерланды, Кабау, 2001 г.), направленные на сравнение данных СВЧ-радиометров различных производителей. Было установлено, что погрешность измерения радиояркостной температуры различными СВЧ-радиометрами, работающими на частотах 21—37 ГГц, составляла около 1—2 К. Также был выполнен анализ различных схемотехнических решений с целью определения путей создания экономичного СВЧ-радиометра для оснащения метеорологической сети. В результате были установлены требования к сетевому СВЧ-радиометрическому комплексу для контроля влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.

Основные требования к техническим характеристикам СВЧ-радиометра сводятся к следующему: спектральный диапазон 21—24 и 31—37 ГГц; полоса усиления приемников 0,2—0,7 ГГц; ширина луча диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности 4—10°; флуктуационная чувствительность 0,1—0,2 К (при постоянной времени интегрирования 1 с); погрешность измерений около 1,0 К; темп обновления данных не более 5 мин.

В настоящее время при создании СВЧ-радиометров влажностного зондирования атмосферы наряду с традиционной схемой супергертеродинного приемника используются СВЧ-радиометрические приемники прямого усиления и детектирования полной мощности. Коэффициент шума современных СВЧ-усилителей в диапазоне частот 20—40 ГГц составляет 2—4 дБ, что позволяет обеспечить требования к флуктуационной чувствительности современных СВЧ-радиометров влажностного зондирования атмосферы (Shchukin et al., 2008).

В последние годы актуальной становится задача применения данных дистанционного зондирования для задач сверхкраткосрочного прогноза погоды и наукастинга. В работе Щукина, Караваяева (2008а) предложена простая модель построения регионального прогностического критерия развития опасных гидrome-

теорологических явлений (ОЯ) на основе статистического анализа СВЧ-радиометрических и радиолокационных данных. Для сверхкраткосрочного прогноза развития конвективного (грозового) облака предложено использовать линейную регрессионную модель для прогностической функции  $Kr$ :

$$Kr = \ln \frac{P_{A_1}(x)}{P_{A_2}(x)} = C_0 + \sum_{k=1}^N C_k x_k,$$

где  $P_{A_1}$  и  $P_{A_2}$  — многомерные плотности вероятности для классов  $A_1$  и  $A_2$  соответственно;  $C_0$  — свободный член;  $C_k$  — коэффициенты регрессии. При  $Kr > 0$  следует ожидать выполнения события, принадлежащего классу  $A_2$ ; в противном случае выполняются условия развития события, принадлежащего классу  $A_1$ .

Предикторы, определяемые на основе СВЧ-радиометрической информации, включают значения влагозапаса атмосферы и его изменения на интервале времени  $T = 3...12$  ч. Предварительное тестирование предлагаемой схемы, проведенное в летний период 2006 г. в п. Воейково, показало, что заблаговременность прогноза ОЯ (грозы, ливней) в условиях Ленинградской области может составлять от 1 до 12 ч при оправдываемости прогноза ОЯ около 0,76.

Разработана концепция развития системы влажностного зондирования атмосферы (ВЗА) (Щукин, Караваев, 2008б), определяющая задачи, решаемые с помощью новой сети, требования по составу определяемых параметров и погрешности их определения, требования по оснащению и другим тактико-техническим параметрам станций, а также требования к системе передачи, усвоения и накопления и способам использования оперативных данных для решения задач мониторинга состояния атмосферы, сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений, контроля АВ. Предложен проект региональной сети в Северо-Западном регионе, которая включает шесть станций дистанционного зондирования, расположенных в Воейково, Выборге, Сосновом Бору, Кингисеппе, Новой Ладогге, Пскове. Эксплуатация такой экспериментальной сети позволит обработать методические вопросы

сетевого зондирования и получить новые результаты о пространственно-временной изменчивости полей влажности в различных метеорологических ситуациях, в том числе в период развития опасных явлений.

#### **СВЧ-радиометрические исследования подстилающей поверхности**

Для задач диагностики и контроля пожароопасности болот была выполнена разработка СВЧ-радиометрического метода определения температуры поверхности суши. Был разработан дешевый портативный прибор для диагностики пожароопасности торфяников, который представляет собой СВЧ-радиометрическое устройство с автономным питанием, предназначенное для дистанционного (с высоты 1—2 м) неконтактного определения границы подповерхностного очага торфяного пожара, локализации зон очага подповерхностного горения слоя торфа с температурой 600—700 К. При создании прибора была реализована схема компенсационного радиометра на основе применения конверторов Ку- и С-диапазонов (Рыбаков и др., 2004; Рыбаков, Щукин, 2008). Прибор имеет малые габариты, масса его не превышает 2 кг. Время автономной работы прибора до 8 ч.

Разработана лабораторная методика определения глубины очага пожара на основе использования имитатора очага пожара (нагреваемого «черного тела», создающего контраст в 50 °С), покрытого слоем высушенного торфа (влажность менее 9 %). Излучение имитатора, проходящее через слой торфа переменной высоты, регистрировалось с помощью СВЧ-радиометров, работающих при длинах волн 7,9; 2,7; 1,35; 0,8 см. Установлено, что использование С-диапазона (длина волны около 8 см) позволяет существенно увеличить глубину обнаружения очага пожара. Долговременная стабильность разработанных приборов достаточна, чтобы обеспечить работу по источникам с контрастами 200—300 °С и весовой влажностью надповерхностного торфяного слоя 28—30 %.

### **Радиолокационные (доплеровские) исследования атмосферы**

Метеорологические радиолокационные станции позволяют получать, обрабатывать, представлять и интерпретировать информацию об облаках и осадках для штормового оповещения об опасных явлениях погоды, обеспечивать безопасность полетов авиации и управление активными воздействиями на градовые и другие гидрометеорологические процессы.

Большие возможности в метеорологии открывает использование доплеровских метеорадиолокаторов (ДМРЛ), позволяющих получать качественно новую информацию, которую невозможно получить с помощью некогерентного радиолокатора (Zrnic, Ryzhkov, 1999). ДМРЛ позволяет обнаруживать с высокой достоверностью и производить количественную оценку параметров таких опасных явлений, как линии шквалов, сдвиг ветра, турбулентность, смерчи, микрошквалы, мезоциклоны и т. д. В последние годы резко возрос интерес к методам поляризационной селекции сигналов в радиометеорологических измерениях. Использование радиолокационных поляризационных ДМРЛ позволяет повысить точность радиолокационного измерения осадков, обнаруживать зоны крупного града в кучевых облаках и определять локализацию зон переохлажденной воды, представляющих опасность в отношении обледенения самолетов и являющихся зонами потенциального градообразования, на которые необходимо осуществлять воздействия на стадии роста грозового облака.

В последние два года были активированы разработки нового радиолокатора для перевооружения и расширения сети МРЛ. Первым шагом на этом пути было создание МРЛ-700С (рис. 6) совместными силами финской фирмы «Vaisala», ВНИИРА и ГУ «ГГО».

Однако более перспективным был признан путь разработки отечественного радиолокатора, получившего название ДМРЛ-СМ. Предъявляемые высокие требования к надежности аппаратуры заставляли искать решения по облегчению режимов работы генераторов СВЧ и привели к идее использования технологии сжатия широкополосных сигналов. Основное препятствие, не позволявшее до последнего времени использовать эту технологию в метеорологической радиолокации, — высокий уровень боковых лепе-



Рис. 6. Радиолокатор МРЛ-700С.

стков — было преодолено специалистами Лианозовского электро-механического завода (ЛЭМЗ) путем модернизации линейно частотно модулированного (ЛЧМ) импульса (Обоснование возможности..., 2006).

В результате был разработан вариант использования нелинейно частотно модулированного (НЧМ) импульса с уровнем боковых лепестков менее  $-50$  дБ во всем заданном интервале доплеровских частот ( $\pm 2$  кГц). Численные эксперименты, основанные на работе Ширмана (Теоретические основы радиолокации,



1970), показали, что присущие данному импульсу недостатки (скоростная ошибка, искажение спектра принимаемого сигнала, смещение по дальности сигнала, имеющего доплеровский сдвиг частоты) при соотношении параметров, обычно выполняющемся в метеорадиолокации, несущественны при коэффициенте сжатия импульсов не менее 30. Для окончательного заключения о применимости НЧМ импульса в метеорологической радиолокации был проведен натурный сравнительный эксперимент с использованием экспериментальной аппаратуры ЛЭМЗ на базе ГУ «ГГО» в п.Воейково (май—июнь 2008 г.) и на базе ГУ «ЦАО» в Крылатском (октябрь—декабрь 2008 г.).

Из возможных схем построения поляризационного ДМРЛ-СМ выбран вариант с одновременным излучением горизонтально и вертикально поляризованных волн, позволяющий оценивать дифференциальную отражаемость, дифференциальную фазу, модуль коэффициента взаимной корреляции (Ryzhkov et al., 2005). Определены требования к антенной системе (максимально допустимые расхождения ширины диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях, уровень боковых лепестков и уровень кросс-поляризационного излучения).

Выполнена разработка программного обеспечения первичной и вторичной обработки данных радиоэха некогерентных и доплеровских МРЛ, позволяющих идентифицировать метеорологические явления (Щукин, Тапасханов, Шаповалов, 2005). Проанализированы различные подходы к разработке программного обеспечения данных ДМРЛ, разработаны алгоритмы программно-математического обеспечения обработки радиолокационной информации, определены оптимальные алгоритмы анализа радиолокационных характеристик облаков.

#### **Разработка вариантов построения пассивно-активных радиолокационных станций (ПАРЛС)**

На протяжении 30 лет в ГГО рассматривались различные схемо-технические и конструктивные варианты реализации объединения пассивного и активного каналов для обеспечения комплексного исследования выбранного объема облака. Такое, наи-

более полное объединение, реализованное на базе МРЛ-2 и на базе авиационного метеолокатора «Гроза», позволяло решать все задачи ПАРЛС, но, в свою очередь, ограничивало выбор частотных диапазонов пассивного канала.

В последние годы в ГГО развивался альтернативный метод реализации ПАРЛС, в котором в качестве общего элемента используется только основное параболическое зеркало МРЛ-5 для создания общих пространственных элементов разрешения по активному и пассивному каналам. Особенность такой конструкции заключается в сохранении облучателя МРЛ-5 и использовании конструктивно независимого варианта встраиваемого в радиолокатор СВЧ-радиометрического модуля. В качестве основного элемента пассивного канала использовались серийные СВЧ-конвекторы, работающие в диапазоне частот 10,7—12,7 ГГц и позволяющие реализовать требования к шумовой температуре системы (коэффициент шума не более 0,5 дБ). Эксперименты показали, что достигнутые параметры электромагнитной совместимости позволяют выполнять одновременные измерения активным и пассивным каналом.

#### **Применение ПАРЛС для оценки степени опасности обледенения ЛА**

Несмотря на достигнутые успехи в изучении физико-метеорологических причин и условий обледенения самолетов, в диагнозе и прогнозе этих условий, а также в разработке все более современных конструкций самолетов и применении более совершенных антиобледенительных устройств, проблема обледенения продолжает оставаться актуальной. К настоящему времени у нас и за рубежом издано большое число работ, освещающих различные аспекты указанной проблемы (Степаненко, 1994; Трунов, 1965).

Одной из важнейших характеристик степени опасности обледенения летательных аппаратов является его интенсивность  $J$  (скорость нарастания толщины льда, измеряемая в мм/мин). Эксперименты показали, что параметр  $J$  существенно зависит от

водности переохлажденных облаков и от трения потока воздуха и летательного аппарата (ЛА).

Задача сверхкраткосрочного прогноза обледенения самолетов решается поэтапно.

1. Производятся обнаружение и распознавание зон возможного обледенения в облаках с помощью ПАРЛС и данных радиозондирования с целью определения геометрических параметров радиоэха (высота верхней и нижней границы облачности), распределения температуры и водности в облаке;

2. Определяется степень опасности обледенения ЛА на основе данных ПАРЛС о водности ( $w$ ) переохлажденной зоны в облаках с использованием следующих эмпирических соотношений:

$$J = 1,18w - 0,12 \text{ при } w < 2,0 \text{ г/м}^3,$$

$$J = 0,15w + 1,76 \text{ } w \geq 2,0 \text{ г/м}^3,$$

а также данных табл. 1 (Степаненко, 1994).

Таблица 1

Характеристики различной степени обледенения ЛА

| Качественная характеристика обледенения | $J$ мм/мин    | $w$ г/м <sup>3</sup> | Изменения в режиме полета при обледенении   | Число полетов |
|---|---------------|----------------------|---|---------------|
| Тяжелое и очень тяжелое                 | Более 1,5     | Более 1,0            | Падение скорости полета на 60—70 км/ч в течение нескольких минут, очень сильные вибрации  | 12            |
| Среднее                                 | От 0,8 до 1,5 | От 0,6 до 1,0        | Возможное падение скорости полета на 20—30 км/ч в течение одного часа, небольшие вибрации | 18            |
| Легкое                                  | Менее 0,8     | Менее 0,6            | Изменения в режиме полета не отмечаются   | 18            |

Из табл. 1 видно, что наибольшие изменения в режиме полета ЛА наступают при  $J > 1,5$  мм/мин. Для распознавания зон, опасных в отношении обледенения самолетов, может быть использован критерий, построенный на основе данных о влажности  $w$  и температуре  $t$  переохлажденных облаков:

$$Kr_{ice} = -1,785w + 0,0312t + 0,4233.$$

3. Составляется сверхкраткосрочный прогноз пространственно-временного распределения зон возможного обледенения вдоль авиатрасс.

При разработке методов диагноза и прогноза обледенения ЛА, и в первую очередь очень тяжелого, необходимо рассматривать слоисто-дождевые (Ns) и высокослоистые (As) облака, несмотря на то что в мощных конвективных облаках возможны более высокие значения влажности переохлажденной влаги, и, следовательно, более высокие значения интенсивности обледенения ЛА.

### Заключение

За последнее десятилетие были получены следующие результаты, имеющие важное научное и прикладное значение.

Разработана радиационная модель переноса теплового микроволнового излучения в системе облачная атмосфера—подстилающая поверхность с учетом процессов многократного рассеяния и поляризации. Созданы алгоритмы интерпретации данных спутниковых наблюдений многоканальных ИК- и СВЧ-радиометров с целью дистанционного зондирования температурно-влажностных характеристик состояния атмосферы и подстилающей поверхности. Выполнены исследования информативности определения вертикальных профилей температуры, влажности, влажности облаков, параметров состояния поверхности по данным различных спутниковых СВЧ-радиометрических комплексов (Метеор-М, NOAA 15—17). Выполненные исследования показали высокую эффективность применения метода СВЧ-радиометрии для определения температурно-влажностных параметров атмосферы, влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.

Выполнены экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при различных метеоусловиях, и в частности в период опасных явлений погоды, связанных с развитием мощных конвективных облаков, гроз, осадков. Определены перспективы использования совместных СВЧ-радиометрических и радиолокационных измерений параметров атмосферы и облаков для улучшения сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений.

Разработана концепция развития сетевого оперативного контроля характеристик влагосодержания атмосферы, обоснован вариант построения региональной СВЧ-радиометрической сети в Северо-Западном федеральном округе и тактико-технические требования к наземной СВЧ-радиометрической аппаратуре влажностного зондирования атмосферы.

Разработаны требования и обоснованы технические предложения по модернизации сети МРЛ на основе современных разработок отечественного доплеровского радиолокатора ДМРЛ-СМ. Особенностью новой разработки является использование нелинейно частотно модулированного твердотельного импульсного локатора с возможностью проведения поляриметрических измерений, оснащенного независимым высокочувствительным пассивным каналом. Разработаны алгоритмы обработки радиолокационной информации.

Разработаны технические предложения по оснащению МРЛ конструктивно независимым пассивным каналом, работающим на частоте около 11,2 ГГц. Радиометр построен на коммерчески доступной элементной базе, обеспечивающей низкую шумовую температуру системы (высокую чувствительность), малые габариты и массу. Данные ПАРЛС перспективно применять для оценки степени опасности обледенения летательных аппаратов.

Основными перспективными направлениями деятельности НИЦ ДЗА в области развития и применения радиофизических методов следует считать: дальнейшие фундаментальные исследования в области распространения микроволн в атмосфере, облаках и осадках с учетом поляризации радиоволн; разработку и использование многочастотных доплеровских активно-пассивных МРЛ с поляризационной селекцией, что позволит увеличить объ-

ем и улучшить качество метеорологической информации; широкое внедрение технических средств автоматизации получения, обработки, распределения и представления информации.

Перспективы использования радиофизических методов в метеорологии связаны с совершенствованием технологий сверхкраткосрочного прогноза и наукастинга на основе усвоения оперативной метеоинформации (в том числе сетевого СВЧ-радиометрического, доплеровского радиолокационного, спутникового дистанционного зондирования атмосферы) в региональных схемах численного мезомасштабного прогноза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Караваев Д. М., Рыбаков Ю. В., Щукин Г. Г., 2004. Разработка метеорологической сети СВЧ-радиометров. — Материалы региональной X конференции по распространению радиоволн, с. 85—86.

Караваев Д. М., Щукин Г. Г., 2004. Применение методов СВЧ-радиометрии для диагноза содержания жидкокапельной влаги в облаках. — Прикладная метеорология, вып. 5 (553), с. 99—120.

Обоснование возможности получения достоверной метеорологической информации в трех координатных твердотельных радиолокаторах с использованием сложных сигналов, 2006. — Материалы КБ «Лира». — 11 с.

Образцов С. П., Щукин Г. Г., 2001. Определение температуры подстилающей поверхности и влагозапаса атмосферы по данным ИСЗ NOAA. — Прикладная метеорология, вып. 3 (549), с. 3—10.

Образцов С. П., Щукин Г. Г., 2004. Восстановление параметров атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых наблюдений в видимом, ИК- и СВЧ-диапазонах электромагнитного спектра длин волн. — Прикладная метеорология, вып. 5 (553), с. 65—98.

Образцов С. П., Щукин Г. Г., 2006. Определение температурно-влажностных характеристик атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений. — Ученые записки РГГМУ, № 3, с. 28—45.

Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю., 1987. Радиотеплолокация в метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат. — 283 с.

Рыбаков Ю. В., Щукин Г. Г., 2008. Некоторые результаты по созданию малобюджетных СВЧ-радиометров для дистанционной индикации пожароопасности лесов и торфяников с использованием серийных компонентов спутникового телевидения. — Труды XXII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» РРВ-22, т. 3, с. 76—78.

Рыбаков Ю. В. и др., 2004. Применение СВЧ-радиометров для обнаружения подповерхностного очага торфяного пожара. — В сб.: Доклады II Всероссий-

ской научной конференции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами». — СПб., с. 119—122.

Степаненко В. Д., 1994. Вероятность и интенсивность обледенения самолетов. — СПб., изд. ГГО. — 99 с.

Теоретические основы радиолокации, 1970 / Под ред. Я. Д. Ширмана. — М.: Советское радио, 560 с.

Трунов О. К., 1965. Обледенение самолетов и средства борьбы с ним. — М.: Машиностроение. — 247 с.

Щукин Г. Г., Караваев Д. М., 2008. Разработка критерия развития облаков и осадков с использованием наземных радиотеплокационных данных и радиолокационной информации. — Труды ГГО, вып. 557, с. 119—132.

Щукин Г. Г., Караваев Д. М., 2008. Некоторые результаты и перспективы исследований в области СВЧ-радиометрии (радиотеплолокации), проводимых в ГГО им. А. И. Воейкова. — Успехи зарубежной радиоэлектроники, № 6, с. 29—37.

Щукин Г. Г., Тапасханов В. О., Шаповалов А. В., 2005. Алгоритмы анализа радиоэха опасных конвективных процессов. — Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям. — М.: ЛКИ, с. 48—51.

Ryzhkov A.V., Schuur T. J., Burgess D.W., 2005. The joint polarisation experiments. — Bull. Amer. Meteor. Soc., p. 809—824.

Shchukin G.G., Rybakov Y.V., Nikitenko A. E., Karavaev D. M., 2008. Microwave radiometer for remote sensing of atmospheric moisture. — TECO-2008, St-Petersburg. — 5 p.

Zrnic D. S., Ryzhkov A. V., 1999. Polarimetry for weather surveillance radars. — Bull. Amer. Meteor. Soc., p. 389—406.

УДК 551.509

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

*А. А. Синькевич, Ю. А. Довгалюк, В. Д. Степаненко,  
Н. Е. Веремей, Н. Н. Волков, А. Б. Куров, Л. В. Пивоварова*

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

Поступила в редакцию 03.06.2009, после доработки 12.09.2009

### Введение

В Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова проводятся традиционно как теоретические, так и экспериментальные исследования в области физики облаков. Основными направлениями исследований в последнее десятилетие являлись следующие:

1) исследование закономерностей развития конвективных облаков и осадков при естественном их развитии и при активных воздействиях методом численного моделирования (Довгалюк и др., 2007; Краус и др., 2007а; Краус и др., 2007б; Краус и др., 2009);

2) лабораторные исследования фазовых преобразований влаги в облаках и туманах, в том числе разработка реагентов для активных воздействий;

3) анализ радиолокационных исследований характеристик конвективных облаков при естественном развитии и при активном воздействии (Веремей, Довгалюк, Савченко, 1999; Краус и др., 2007а; Краус и др., 2007б; Краус и др., 2009);

4) изучение микроструктуры облаков и их термодинамических характеристик (Синькевич, 2001; Sinkevich, Lawson, 2005; Синькевич, Веремей, Волков и др., 2005);

5) совершенствование лабораторного оборудования и создание новых приборов.

Наряду с перечисленными выше, в период 1999 — 2009 гг. развивались и новые направления:



1) получение характеристик кучево-дождевых облаков путем совместного использования данных измерений со спутника «Meteosat», радиолокационных данных и численного моделирования;

2) исследование обледенения летательных аппаратов и наземных конструкций (Степаненко и др., 2004);

3) разработка основ системы активной защиты населения и местности от радиоактивных аварийных выбросов АЭС; изучение возможности очищения атмосферы от радиоактивных аэрозолей искусственно вызываемыми осадками и с использованием системы очищающих фильтров (Веремей, Довгалюк, Савченко, 1999; Довгалюк, Синькевич, Степаненко и др., 2002);

4) оценка экономической эффективности активных воздействий (Sinkevich et al., 2001).

В настоящей работе приводятся основные итоги исследований, выполненных за последние десять лет, которые продолжили работы, начатые в предыдущие годы (Довгалюк, Синькевич, Степаненко, 2001).

## **1. Исследования по физике конвективных облаков**

### ***1.1. Численное моделирование эволюции конвективных облаков и формирования осадков, тестирование численной модели***

В связи с быстрым развитием вычислительной техники в настоящее время особенно интенсивно развиваются численные методы моделирования динамики облаков и процессов формирования в них осадков. Отчасти это обусловлено тем, что самолетные исследования в силу экономических причин могут проводиться в весьма ограниченном объеме, а натурные наблюдения за облаками в основном осуществляются дистанционно с поверхности Земли методом радиолокационного зондирования.

В области численного моделирования в ГГО дальнейшее развитие получили работы по совершенствованию численной нестационарной полуторамерной модели конвективного облака и расширению круга задач, для решения которых она применялась. В результате на сегодня имеется несколько версий данной модели (Довгалюк и др., 2007), позволяющих решать разные задачи физики облаков. Краткое описание этих версий и их назначение представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Версии численной нестационарной полуторамерной модели  
конвективного облака и области их применения**

| № п/п | Версия модели   | Краткое описание   | Область применения   |
|-------|---|--|--|
| 1     | Базовая модель осадкообразующего конвективного облака   | Уравнения гидротермодинамики и переноса субстанций, параметризованное описание микрофизических процессов   | Исследование закономерностей эволюции конвективных облаков и связанных с ними осадков в разных физико-географических условиях  |
| 2     | Модель электризации конвективного облака  | То же, что базовая, а также уравнения переноса электрических зарядов, формула для расчета напряженности электрического поля и параметризованное описание электризации облачных частиц и частиц осадков                                       | Исследование закономерностей формирования электрической структуры конвективного облака на разных стадиях его жизни и образования грозových разрядов  |
| 3     | Модель конвективного облака, содержащего грубодисперсные аэрозольные примеси (Довгалюк и др., 2002) | То же, что модель электризации, а также уравнения переноса грубодисперсных аэрозольных частиц и параметрические выражения описания их взаимодействия с облачными частицами и частицами осадков   | Исследование влияния аэрозольных примесей на эволюцию конвективного облака и вымывание аэрозольных частиц осадками на подстилающую поверхность   |
| 4     | Физико-статистическая модель (Веремей и др., 2004; Довгалюк и др., 2008)                            | То же, что базовая, а также эмпирические выражения, описывающие вероятность возникновения и (или) количественные характеристики опасных явлений, связанных с развитием конвективных облаков, получаемые на основе рассчитанных характеристик | Специализированный краткосрочный прогноз образования и развития конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений (ливни, грозы, град, шквалы, обледенение летательных аппаратов, поражение самолетов молнией, болтанка и др.) |

В этот же период был доработан метод прогноза развития конвективных облаков, основанный на совместном использовании численной нестационарной полутримерной модели облака и статистических данных о характеристиках облаков. В частности, выполнен учет фонового ветра в основном облакообразующем слое, позволяющий проследить распределение осадков вдоль траектории движения облака (предполагается, что последнее полностью увлекается воздушным потоком), включен упрощенный метод прогноза шквалов на основании данных расчетов.

С помощью базовой модели проведен цикл численных экспериментов по исследованию характеристик конвективных облаков в разных физико-географических районах, в том числе Северо-Западном регионе РФ, Канаде (Краус и др., 2007а, Краус и др., 2009), Индии (Краус и др., 2007б), Саудовской Аравии. Изучены особенности эволюции конвективных облаков, развивающихся в разных регионах. Выяснено, что особенности развития конвективных облаков зависят от рельефа подстилающей поверхности, вертикального температурно-влажностного строения атмосферы и особенностей циркуляции воздуха в данном районе. Так, в Саудовской Аравии происходит образование мощных кучево-дождевых градовых облаков при сравнительно низкой влажности воздуха в слое развития конвекции. В Индии возможно образование мощных кучево-дождевых облаков, дающих сильные ливни, но не дающих осадков в виде града. В Канаде, напротив, систематически наблюдаются сильные градобития при меньших значениях мощности облаков. Численные эксперименты показали удовлетворительное соответствие между рассчитанными и наблюдаемыми значениями высоты верхней границы конвективных облаков. В частности, анализ экспериментов в Канаде показал, что среднее значение разности высоты верхней границы по данным численного моделирования и результатам измерений составляет 0,70 км ( $\sigma = 1,95$  км). Объем выборки составил 143 дня.

Применительно к условиям Канады проведен анализ эффективности активных воздействий на градовые облака с целью ослабления градобитий. Модель хорошо воспроизводит особенности динамики облаков при естественном их развитии и при воздейст-

вии, и в частности результат воздействий. Так, максимальный по высоте средневзвешенный радиус градин после воздействия уменьшается в 2—3 раза по сравнению со случаем естественного развития (Краус и др., 2009).

Версия модели, в которой учитывался аэрозоль, использовалась для численного моделирования вымывания радиоактивных аэрозольных примесей из атмосферы осадками, выпадающими из конвективных облаков (Веремей, Довгалюк, Егоров и др., 1999; Довгалюк, Синькевич, Степаненко и др., 2002). Полученные значения коэффициента вымывания аэрозоля из атмосферы соответствуют наблюдаемым в натуральных условиях.

Отметим также исследования, проводимые с целью тестирования результатов численного моделирования конвективных облаков по данным МРЛ. Показано, что из большого числа физических параметров конвективных облаков, рассчитываемых в численных моделях, радиолокационным методом определяются с удовлетворительными погрешностями лишь следующие: 1) горизонтальные размеры облаков и зон осадков на разных уровнях (их площади); 2) высота верхней и нижней границ; 3) время начала и окончания выпадения осадков, их интенсивность и количество; 4) радиолокационная отражаемость; 5) высота нулевой изотермы в дождевых облаках; 6) время начала грозовой деятельности. Дальность уверенного определения указанных характеристик составляет для  $Cu\ song$ . 30—40 км, для  $Cb$  — 100—120 км.

Как известно, целью тестирования является определение степени адекватности результатов, полученных с использованием численной модели конвективных облаков, данным радиолокационных измерений по выбранным для этого расчетным физическим параметрам.

Для решения этой задачи в работе Довгалюк, Веремей, Степаненко (2005) представлена последовательность соответствующих операций, включающая определение корреляционных связей между расчетными и измеренными параметрами облака отдельно для каждого параметра. Тщательный анализ этих связей позволяет судить о степени адекватности численной модели конвективного облака.

В 2007—2009 гг. в ГГО начата разработка трехмерной модели конвективного облака, которая выполняется совместно с ЦАО, ВГИ и НПО «Тайфун». Сформулирована концепция модели, составлена система уравнений гидротермодинамического блока (Довгалюк, Веремей, Владимиров и др., 2008).

### *1.2. Лабораторные эксперименты по исследованию замерзания капель с использованием гигроскопического реагента и фуллероидных наночастиц*

В 1999—2009 гг. продолжались лабораторные эксперименты по исследованию процессов замерзания капель дистиллированной воды и растворов солей. В отличие от экспериментов прошлых лет их целью было детальное изучение динамики замерзания капель, что оказалось возможным благодаря использованию современной ПЭВМ. Эксперименты проводились на базе лабораторной установки — малой камеры «Капля» в сочетании с ПЭВМ. Это позволило визуализировать процесс динамики замерзания капель в непрерывном режиме с момента «схватывания» капли до полного ее замерзания. В данной установке также была усовершенствована система охлаждения, что позволило регулировать скорость охлаждения исследуемых капель. Изучались процессы замерзания при введении в объем либо на поверхность водяных капель частиц реагентов различной дисперсности и природы (как гигроскопических, так и негигроскопических).

Впервые были проведены эксперименты по исследованию влияния на процесс замерзания водяных капель модифицирования их новым химически синтезированным веществом. Это вещество представляет собой углеродные фуллероидные наночастицы (УФН), характеризующиеся необычностью структуры и электрических свойств. Их структура по своей организации подобна структуре водяных кластеров, что может оказаться существенным фактором для льдообразования при использовании аэрозолей такого типа.

Объемное модифицирование капель воды частицами УФН осуществлялось с помощью ультразвукового диспергатора. Поверхностное модифицирование достигалось путем обработки ка-

пель дистиллята аэрозолем из УФН. Измерение температуры замерзания капли показало, что замерзание капли во всех случаях начинается с поверхности (данный факт подтверждается видеосъемкой). При объемном модифицировании температура замерзания капли понижается в среднем на 8 °С, а при поверхностном — на 13 °С. Таким образом, поверхностное модифицирование является энергетически более выгодным.

### *1.3. Влияние коронных разрядов на фазовые переходы воды в облаках*

Электрические силы являются важнейшим фактором, влияющим на процессы осадкообразования в облаках (Шишкин, 1974). Более того, любое активное воздействие на облако методом засева реагентом есть электрическое воздействие вследствие диспергирования используемых веществ или их растворов.

На сегодня многие физические аспекты влияния электрических сил на фазовые и микроструктурные преобразования облачной среды остаются недостаточно изученными. Поэтому в текущем десятилетии продолжались исследования влияния электрических сил на фазовые и микроструктурные преобразования воды в облаках. При этом особое внимание было уделено исследованию роли электрических разрядов различных типов, создающих в облаке зоны повышенной ионизации и, следовательно, новые микроструктурные эффекты (Степаненко и др., 2002; Sinkevich et al., 2003).

На базе лабораторного комплекса ГГО были созданы две установки. В первой из них использовалась малая камера туманов (МКТ) с внутренним объемом 0,006 м<sup>3</sup> и рабочим диапазоном температур от 20 до –25 °С. В ней проводился цикл экспериментов, в которых были изучены влияние электрических полей и разрядов от высоковольтного источника на температуру замерзания капель. Напряженность постоянного электрического поля варьировалась в разных экспериментах от 4 до 30 кВ/см, переменного — от 5 до 30 кВ/см. Процесс кристаллизации капель регистрировался с помощью микроскопа. Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и 3 и на рис. 1 и 2.

Таблица 2

Статистические характеристики температуры замерзания капель (°С)

| Условия эксперимента          | Объем выборки | Среднее | Медиана | Мода | Стандартное отклонение | Минимум | Максимум |
|-------------------------------|---------------|---------|---------|------|------------------------|---------|----------|
| Без электрического поля       | 49            | -15,5   | -16,5   | -    | 3,3                    | -20,5   | -6,8     |
| Постоянное электрическое поле | 52            | -11,9   | -11,7   | -8,0 | 3,4                    | -19,0   | -6,5     |
| Переменное электрическое поле | 42            | -5,5    | -5,1    | -5,0 | 1,1                    | -9,0    | -4,0     |

Таблица 3

Повторяемость (%) различных градаций отношения оптических плотностей туманов  $q = D_i/D_{i+1}$ 

| Условия эксперимента            | q       |         |         |         |         |         |       |           | Число измерений |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-----------|-----------------|
|                                 | 0,1—0,5 | 0,5—1,0 | 1,0—1,5 | 1,5—2,0 | 2,0—2,5 | 2,5—3,0 | > 3,0 | $\bar{q}$ |                 |
| $T > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ |         |         |         |         |         |         |       |           |                 |
| Без воздействий                 | 8,0     | 10,0    | 39,0    | 39,0    | 4,0     | —       | —     | 1,27      | 74              |
| При воздействиях                | —       | 1,6     | 43,5    | 48,5    | 4,8     | 1,6     | —     | 1,75      | 63              |
| Без воздействий                 | —       | 12,5    | 50,0    | 37,5    | —       | —       | —     | 1,49      | 76              |
| При воздействиях                | —       | —       | 25,0    | 62,5    | 12,5    | —       | —     | 1,76      | 57              |
| $T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ |         |         |         |         |         |         |       |           |                 |
| Без воздействий                 | —       | —       | 20,0    | 40,0    | 40,0    | —       | —     | 1,96      | 40              |
| При воздействиях                | —       | —       | —       | 40,0    | 20,0    | 20,0    | 20,0  | 2,54      | 18              |

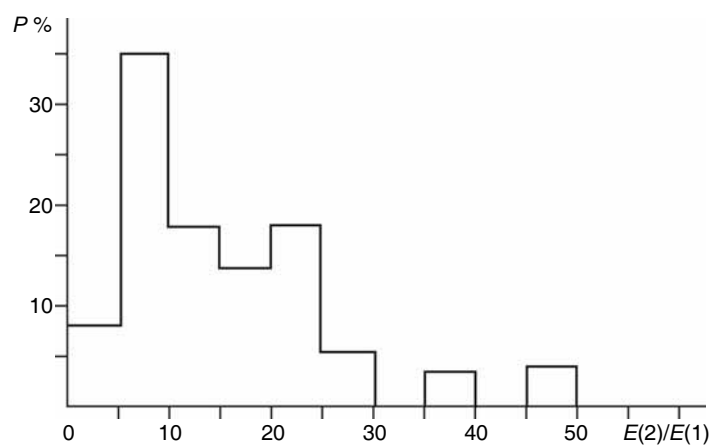


Рис. 1. Гистограмма повторяемости ( $P$ ) значений отношения  $E(2)/E(1)$ .  $E(1)$  и  $E(2)$  — напряженность электрического поля до включения генератора ( $E(1)$ ) и через 1—5 с после его отключения ( $E(2)$ ).

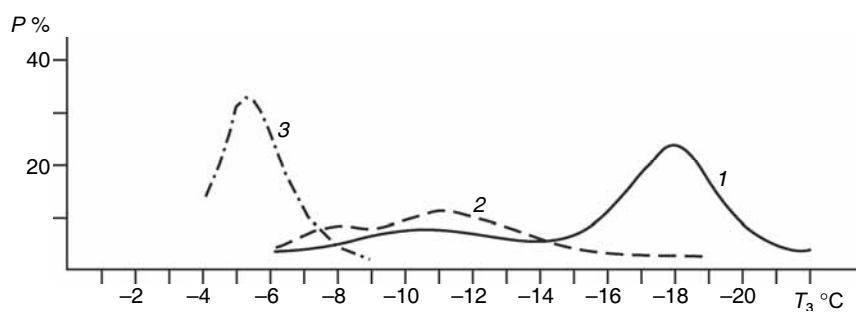


Рис. 2. Повторяемость ( $P$ ) значений температуры замерзания капель  $T_3$  в разных экспериментах.

1 — без электрического поля, 2 и 3 — с постоянным и переменным электрическим полем соответственно.

Из приведенных данных следует, что постоянное электрическое поле повышает температуру замерзания капель. Среднее значение, медиана и мода температуры замерзания смещаются в область более высоких по сравнению с фоновыми опытами значе-



ний на 3—5 °С. При этом отмечается уширение максимума. Переменное электрическое поле, сопровождаемое коронными разрядами, приводит к еще большему смещению указанных характеристик в область высоких температур. При этом их значения оказываются в более узком интервале — от –4 до –8 °С. Такая высокая температура характерна для случаев замерзания капель при воздействиях лучшими из известных в настоящее время реагентов. Максимальное и минимальное значения температуры замерзания равны –4 и –9 °С соответственно. Диапазон значений температуры замерзания весьма узок, что указывает на сильное влияние разрядов на замерзание капель.

На второй установке изучалось влияние коронных разрядов на форму кристаллов. Эксперименты выполнялись в средней камере туманов («Кюлинг») с внутренним объемом 0,6 м<sup>3</sup> и рабочим диапазоном температуры от 20 до –20 °С. Для определения микрофизических характеристик применялось специальное устройство для забора проб. Проведенные эксперименты подтвердили факт зависимости формы кристаллов от коронных разрядов. Получено, что коронные разряды приводят к образованию кристаллов сложных форм.

Исследования динамики микроструктуры тумана при разряде проводились в большой камере туманов (БКТ). Внутренний объем камеры составлял 110 м<sup>3</sup>, эксперименты проводились при температуре выше 0 °С. Камера оснащена паровым котлом для создания тумана, комплексом аппаратуры для измерения температуры и влажности воздуха в камере, водности и оптической плотности тумана, напряженности электрического поля, а также аппаратурой для измерения размеров капель тумана. Для создания высоковольтного разряда использовался трансформатор Тесла. Важно подчеркнуть, что электрическое поле трансформатора и следующий за ним разряд приводят к сильной ионизации среды с последующим зарядением капель.

Для оценки влияния разрядов были проведены две серии экспериментов, в которых изучались изменения со временем характеристик тумана без воздействия и при воздействии разрядом от указанного высоковольтного источника. Получено, что высоковольтные разряды и ионизация среды приводят к существенному

укрупнению капель тумана, и соответственно различаются скорости изменения влажности тумана. Максимум повторяемости для случаев без воздействия приходится на интервал  $0,01—0,40$  г/(м<sup>3</sup> · с), а для случаев с воздействием — на интервал  $0,4—0,6$  г/(м<sup>3</sup> · с).

## **2. Изучение обледенения летательных аппаратов и наземных объектов**

Весьма нежелательным, а в ряде случаев и опасным является процесс обледенения летательных аппаратов и наземных объектов в условиях наличия большого количества переохлажденной воды в атмосфере. К настоящему времени выполнено значительное число теоретических и экспериментальных работ, посвященных этой проблеме, однако она окончательно не решена. В связи с этим были продолжены работы в данном направлении.

Недостаточно ограничиваться только диагнозом и прогнозом обледенения летательных аппаратов. Весьма желательны усилия, направленные на борьбу с этим опасным явлением. В этой связи следует отметить работу специалистов ГГО и Росгидромета, за которую они получили патент на изобретение (Степаненко, Щукин, Гальперин и др., 2004). Был разработан способ уменьшения обледенения летательных аппаратов. Он предполагает определение до начала полета с помощью радиозондовых данных и данных активно-пассивного радиолокационного метеорологического зондирования вертикальных и горизонтальных размеров зон переохлажденных облаков, их скорости и направления движения, а также определение по измеренным значениям радиояркостной температуры и протяженности зон переохлажденных облаков их средней влажности в радиальном направлении.

Отличие этого способа от предложенных ранее состоит в том, что по измеренному значению средней влажности в радиальном направлении и экспериментально установленной зависимости интенсивности осадков от влажности определяют зоны возможного обледенения и проводят воздействия на указанные зоны путем ввода в них льдообразующих реагентов. Достижимый результат заключается в уменьшении влажности и ослаблении обледенения или его предотвращении.

В период 2006—2008 гг. была выполнена разработка нового автоматизированного регистратора гололедно-изморозевых отложений (ГИО) для наземных служб. В основу прибора положен оптический метод определения физических параметров образующегося слоя ГИО, что позволяет фиксировать толщину слоя, его массу, вид отложений, время начала и конца процесса обледенения и его скорость.

Основным элементом конструкции прибора (рис. 3) является цифровой фоторегистратор (1), осуществляющий съемку измерительных стержней (2), на которых образуются ГИО. Получаемые снимки передаются для последующей обработки на ПЭВМ, где производится расчет всех необходимых параметров. Использование дополнительных элементов конструкции, таких как экран (3) и динамометрические стойки (4), позволяет повысить качество и объем получаемой информации.

Созданный в ходе выполнения работы макет регистратора (см. рис. 3) позволил провести целый комплекс лабораторных и натурных испытаний, которые показали его работоспособность и возможность применения на метеопостах и площадках для оценки обледенения линий связи, линий электропередач, различных сооружений и конструкций. На рис. 4 представлены данные об изменении толщины слоя льда вдоль измерительного стержня с течением времени.

### **3. Использование данных измерений спутника «Meteosat» для получения характеристик конвективных облаков**

В последние десятилетия широко развиваются исследования характеристик атмосферы, облаков и подстилающей поверхности с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ). Среди ИСЗ в особую категорию выделяются геостационарные. Использование спутниковых данных для метеорологических исследований является важным и актуальным направлением, так как не все районы доступны для наземных наблюдений. В настоящее время в ГГО успешно развиваются работы по использованию данных геостационарного спутника «Meteosat» для получения характеристик конвективных облаков. Эти работы проводятся в комплексе с радиолокационными измерениями и численным моделированием облаков.

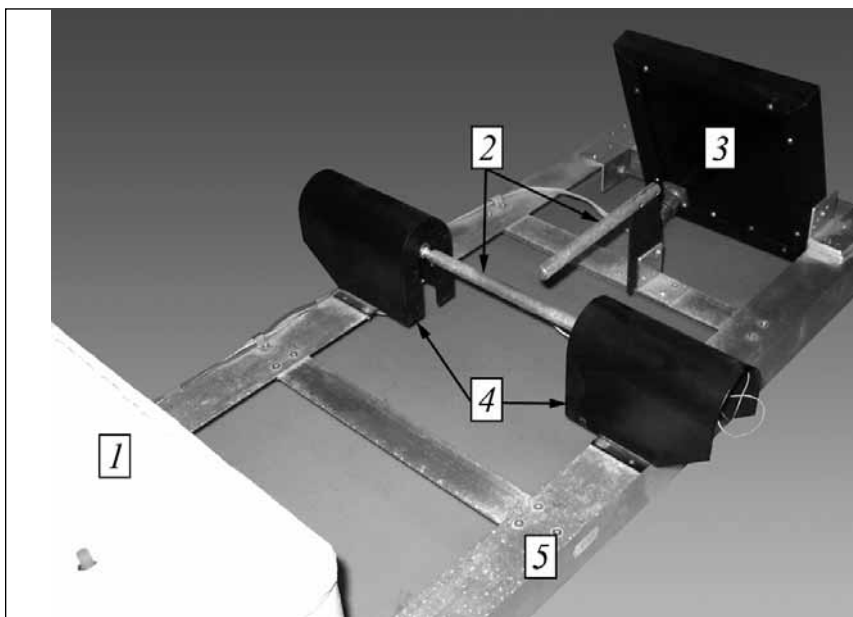


Рис. 3. Макет автоматизированного регистратора ГИО.  
1 — цифровой фоторегистратор, 2 — измерительные стержни, 3 — экран,  
4 — динамометрические стойки, 5 — рама.

Примером такого комплексного подхода является анализ эксперимента, проведенного в пустынной части Саудовской Аравии в 2008 г., в процессе которого непрерывные спутниковые и радиолокационные наблюдения за кучево-дождевым облаком проводились в течение 5 ч.

В результате были получены данные о динамике развития Сб, и в частности об эволюции его наковальни; показано, что характеристики наковальни существенно различны в зоне ее формирования непосредственно над облаком и по мере удаления от облака; установлено, что радиолокатор существенно недооценивает горизонтальные размеры наковальни. Была также выполнена оценка интенсивности осадков из исследуемого облака с использованием данных спутниковых и радиолокационных измерений

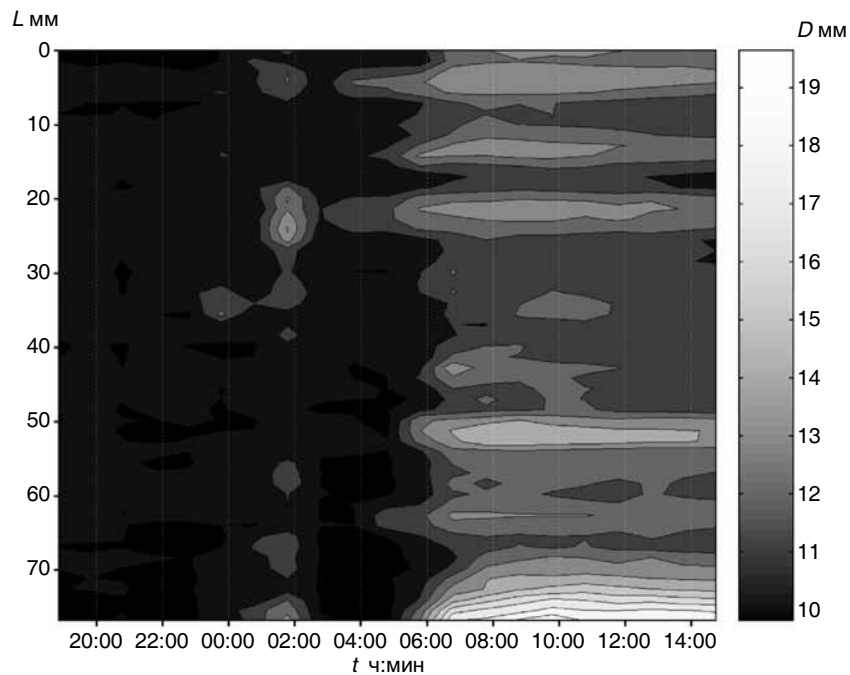


Рис. 4. Пример роста слоя ГИО вдоль поверхности первого измерительного стержня в ходе полевых испытаний, проведенных в январе—апреле 2008 г.  $L$  — расстояние от левого края первого измерительного стержня,  $t$  — время,  $D$  — диаметр отложений.

и проведено сравнение с результатами численного моделирования; получено, что интенсивность осадков могла достигать 100 мм/ч; при этом радиолокационные оценки интенсивности осадков заметно ее завышают, что в данном случае связано с наличием крупных градовых частиц.

В качестве примера на рис. 5 приведены снимки облаков, развивающихся над пустынной частью Саудовской Аравии, полученные со спутника «Meteosat» во время указанного комплексного эксперимента (использовался диапазон длин волн 0,4—1,1 мкм).

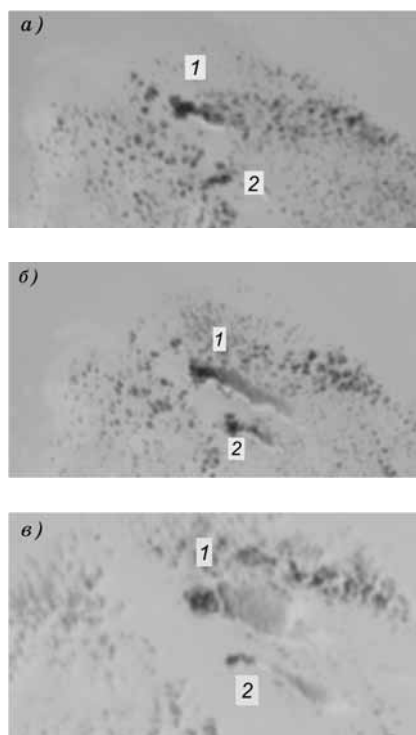


Рис. 5. Изображение облаков, полученное каналом высокого разрешения для разных моментов времени.  
*a* — 20 мин, *б* — 60 мин, *в* — 140 мин.  
 1 — большое облако с наковальней; 2 — облако меньшего размера, образовавшееся позднее.

#### **4. Разработка новых методов и средств активных воздействий на грозо- и смерчопасные облака**

Смерчи — одно из самых опаснейших явлений, связанных, как правило, с грозовыми облаками. Однако физические причины их образования до сих пор неизвестны, нет удовлетворительных физико-математических моделей смерчопасных облаков и самих смерчей.

Вместе с тем накоплен большой объем результатов наблюдений, включающих следующие данные: географическое распространение смерчей в глобальном масштабе; их геометрические размеры; строение, скорость поступательного и вращательного движения; их тип; сведения об объектах и площадях разрушений, связанных со смерчами, сравнимых с результатами массивных ракетно-артиллерийских обстрелов или авиационных бомбардировок, и т. д.

Как выяснилось, общие аэросиноптические условия, при которых образуются смерчи над территорией нашей страны, почти во всех случаях связаны с меридиональной формой циркуляции атмосферы. Иногда смерчи возникают при бризовой циркуляции в прибрежных районах Черного моря и на Дальнем Востоке.

Ниже в качестве примера описаны аэрологические условия, при которых образовался смерч в Санкт-Петербурге в малоградиентном барическом поле в августе 1973 г. в первой половине дня. Анализ данных радиозондирования и радиолокационных данных, полученных перед образованием смерча и сразу после его исчезновения, показал весьма сильную термическую неустойчивость в слое атмосферы 600—520 гПа, когда вертикальный градиент температуры воздуха достигал  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ . Это обусловило интенсивное развитие конвективного грозового облака Сб с высотой верхней границы 9—11 км, дающего осадки в виде дождя и града.

Весьма важным является заблаговременное предупреждение о приближении смерчопасных грозовых облаков, позволяющее принять соответствующие меры: оповестить население, организовать защиту важных объектов путем проведения соответствующих АВ. Необходимая заблаговременность вполне обеспечивается современными МРЛ, которые обнаруживают грозовые смерчевые облака в радиусе около 150 км практически с вероятностью 100 %. Заблаговременность при этом составляет 3—3,5 ч для пункта установки МРЛ. Между тем необходимо не только обнаружить грозовое облако, но и распознать его на предмет смерчопасности. Эта задача в настоящее время решается с помощью доплеровских МРЛ (Степаненко, Довгалюк, Веремей и др., 2007).

В настоящее время наиболее рациональным способом разрушения смерчей следует признать их обстрел с помощью современных ракетно-артиллерийских систем. Однако каких-либо публикаций о результатах применения таких систем в указанных целях не обнаружено.

В 2005 г. впервые были собраны и обобщены экспериментальные данные о развитии смерчеопасных облаков в регионе с высокой грозовой активностью и большой вероятностью образования смерчеопасных облаков (Альберта, Канада, 2005 г.). Проведенное численное моделирование развития этих облаков с использованием численной нестационарной полуторамерной модели показало, что расчетные значения характеристик облаков (высоты верхней границы, радиолокационной отражаемости и фактов наличия явлений) достаточно хорошо согласуются с данными натурных наблюдений. Это позволило сделать вывод о том, что данная модель может быть использована для моделирования смерчеопасных облаков и прогноза их развития.

#### **5. Разработка основ системы активной защиты населения и местности от радиоактивных аварийных выбросов АЭС**

Хорошо известно, что каким бы современным оборудованием ни оснащались ядерные реакторы АЭС, какая бы система контроля блокировки ни устанавливалась, вероятность аварий и катастроф на АЭС к абсолютному нулю свести нельзя. Отсюда вытекает, что одновременно с проведением изысканий по повышению надежности функционирования АЭС необходимо в районах их размещения создавать надежные системы контроля радиационной обстановки (в том числе и дистанционного), а также системы защиты населения и местности в аварийных ситуациях (Гальперин, Дроздецкий, Степаненко и др., 1997; Дроздецкий, Кубрин, Степаненко и др., 1998).

За последние годы в отделе физики облаков проводились исследования в данном важном направлении по конкурсным грантам, полученным от Правительства Санкт-Петербурга в 2004, 2006



и 2007 гг. Решались задачи, связанные с радиолокационным обнаружением аварийных выбросов на ЛАЭС. В результате был разработан и запатентован новый способ радиолокационного обнаружения и прослеживания аварийных выбросов. В дальнейшем был предложен комплексный радиолокационно-лидарный способ определения микроструктуры и геометрических размеров аэрозольного аварийного радиоактивного факела при аварии на ЛАЭС.

Для аварийных условий является важным физическое обоснование методик защиты населения от радиоактивных выбросов путем применения объемных зарядов, метеотронов и водоструйных аппаратов, выпускаемых промышленностью. Такие задачи были успешно решены, так же как и задачи по разработке технических заданий на ОКР на элементы, входящие в указанную систему дистанционного контроля и защиты населения от радиоактивных загрязнений при аварии на ЛАЭС.

### **Заключение**

В заключение выделим наиболее важные направления исследований конвективных облаков и осадков:

- 1) развитие численного моделирования конвективных облаков и осадков, включая методику тестирования;
- 2) дальнейшие исследования по поиску новых льдообразующих реагентов, в частности фуллероидных частиц;
- 3) изучение влияния коронных разрядов на фазовые и микроструктурные преобразования воды в облаках;
- 4) исследование условий обледенения летательных аппаратов и наземных объектов;
- 5) разработка новой научно-исследовательской аппаратуры;
- 6) создание методики обработки данных, получаемых со спутника «Meteosat», и их использование для исследования развития конвективных облаков в разных регионах, в частности динамики эволюции наковален кучево-дождевых облаков;
- 7) разработка основ системы активной защиты населения и местности от аварийных радиоактивных выбросов АЭС путем активных воздействий на атмосферные процессы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беспалов Д. П., Девяткин А. М., Довгалюк Ю. А., Кондратюк В. И., Кулешов Ю. В., Светлова Т. П., Суворов С. С., Тимофеев В. И., 2006. Атлас облаков. — СПб: Гидрометеиздат. — 248 с.
- Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Егоров А. Д., Ищенко М. А., Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А., Сталевич Д. Д., Степаненко В. Д., Хворостовский К. С., 1999. Исследования влажного вымывания аэрозольных частиц облаками и осадками. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 5—14.
- Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Савченко И. А., Синькевич А. А., Степаненко В. Д., 1999. Исследование возможности радиолокационного обнаружения облаков, образующихся в атмосфере при авариях на АЭС. — Докл. РАН, Физика атмосферы и океана, т. 35, № 4, с. 523—530.
- Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Синькевич А. А., 2004. О прогнозе развития конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений // В сб.: Вопросы физики облаков. — СПб: Гидрометеиздат, с. 87—97.
- Гальперин С. М., Дроздецкий С. Е., Степаненко В. Д. и др., 1997. Устройство определения радиоактивных выбросов в атмосферу. Патент на изобретение № 3145094 с приоритетом от 05.05.1997 г.
- Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., 2007. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. — СПб: Астерион. — 162 с.
- Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров А. С., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Стасенко В. Н., Степаненко В. Д., Шаповалов А. В., Щукин Г. Г., 2008. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I. Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока. — Труды ГГО, № 558, с. 102—142.
- Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Слепухина А. К., 2008. О прогнозе развития конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений с помощью модели малой размерности. — В сб.: Вопросы физики облаков. Памяти С. М. Шметера. — М., с. 154—167.
- Довгалюк Ю. А., Синькевич А. А., Степаненко В. Д., 2001. Исследования по физике облаков и активным воздействиям. — В сб.: Современные исследования Главной геофизической обсерватории. К 150-летию основания. Т. 2. — СПб: Гидрометеиздат, с. 146—162.
- Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Степаненко В. Д., Емельянова В. Н., Синькевич А. А., 2005. О тестировании численных моделей облаков по данным МРЛ. — Труды XXIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационные исследования природных сред». Вып. 5. — СПб., с. 509—513.
- Довгалюк Ю. А., Синькевич А. А., Степаненко В. Д., Кубрин В. И., Ищенко М. А., Веремей Н. Е., 2002. О применении численной модели конвективного облака для оценки аэрозольного загрязнения подсти-

лающей поверхности при аварии на АЭС. — В сб.: Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха / Под. ред. С. С. Чичерина. — СПб., с. 332—343.

Дроздецкий С. Е., Кубрин В. И., Степаненко В. Д., Гальперин С. М., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е. и др., 1998. Система активной защиты населения от радиоактивных выбросов атомных объектов (применительно к АЭС в Сосновом Бору). — СПб., Аван-проект. — 117 с.

Краус Т. В., Синькевич А. А., 2007. Исследование движения кучево-дождевых облаков в Канаде (провинция Альберта). — Метеорология и гидрология, № 2, с. 30—42.

Краус Т. В., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д., 2007. Исследование развития сверхмощного кучево-дождевого облака (провинция Андхра-Прадеш, Индия, 28 сентября 2004 г.). — Метеорология и гидрология, № 1, с. 30—42.

Краус Т. В., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д., 2009. Оценка результатов воздействий на кучево-дождевое облако с целью ослабления града в провинции Альберта (Канада) по данным радиолокатора и численного моделирования. — Метеорология и гидрология, № 4, с. 39—53.

Першина Т. А., Довгалюк Ю. А., 2005. Атлас снежинок (снежных кристаллов). — СПб.: Гидрометеиздат, 55 с.

Синькевич А. А., 2001. Конвективные облака северо-запада России. — СПб.: Гидрометиздат. — 106 с.

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

Степаненко В. Д., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., 2007. Изучение смерчевых облаков по результатам отечественных радиолокационных и аэрологических наблюдений. — Труды XXIV Всероссийского симпозиума «Радиолокационные исследования природных сред». — СПб., с. 420—427.

Степаненко В. Д., Довгалюк Ю. А., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Пономарев Ю. Ф., Першина Т. А., 2002. Исследование влияния электрических разрядов на фазовые и микроструктурные преобразования воды в облаках. — Метеорология и гидрология, № 3, с. 39—50.

Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Гальперин С. М., Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Стасенко В. Н., 2004. Патент на изобретение «Способ уменьшения обледенения летательных аппаратов». № 2228883 от 20 мая 2004 г.

Шишкин Н. С., 1974. О максимально возможной электризации облаков при наличии коронных разрядов между падающими частицами осадков. — Труды ГГО, вып. 290, с. 16—20.

Sinkevich A. A., Dovgaljuk J. A., Stepanenko V. D., Kashleva L. V., 2003. Corona discharge in clouds (overview). Proc XII Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Versal, p. 241—244.

Sinkevich A. A., Kim J. Y., Suh A. S., Chung H. S., 2001. Losses in the Korean economy due to lack of routine cloud seeding. — J. Korean Met. Soc., 37, 3, p. 283—294.

Sinkevich A. A., Lawson P. A., 2005. Survey of temperature measurements in convective clouds. — J. Appl. Met., V. 44, No. 7, p. 1133—1145.

УДК 551.509.6+551.594

**АКТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАЧНЫЕ СИСТЕМЫ С  
ЦЕЛЬЮ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСАДКОВ И МОЛНИЕВОЙ  
АКТИВНОСТИ**

*С. М. Гальперин, В. Н. Козлов, В. Д. Степаненко, Г. Г. Щукин*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
19421 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7  
e-mail: shchukin@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 04.03.2009, после доработки 03.08.2009

**Введение**

В 2000—2008 гг. ГГО осуществляла работы по активным воздействиям (АВ) на облачные системы с целью метеозащиты мегаполисов, искусственного вызывания осадков с целью тушения лесных пожаров, регулирования электрической безопасности наземных и надводных объектов (линии электропередач, АЭС и др.).

Метеозащита мегаполисов проводилась в следующие периоды:

в дни празднования 300-летия Санкт-Петербурга 30—31 мая 2003 г.;

в дни празднования 1000-летнего юбилея Казани и 15-летия Республики Татарстан 30 августа 2005 г.;

во время проведения в Санкт-Петербурге праздника «Алые паруса» 23—24 июня 2006 г.;

в период проведения в Санкт-Петербурге встречи глав государств «Большой восьмерки» с 15 по 17 июля 2006 г.;

в период торжественных мероприятий в Ташкенте в 2002—2003 гг.

Результаты изложены в работах Щукина и др. (2004), Айсина и др. (2007), Атабиева и др. (2002).

Работы по АВ ГГО осуществляла совместно с Автономной некоммерческой организацией «Агентство атмосферных технологий» (АНО «Агентство АТТЕХ»), ЗАО «Центр внедрения методов

и средств АВ на погоду «АКВА», в/ч 22737, ЦАО, Северо-Западным УГМС.

Для проведения работ по метеозащите создавался оперативный штаб по управлению воздушными судами. В процессе подготовки к АВ утверждалась Временная инструкции по организации и производству полетов, составлялась программа проведения АВ и график выполнения полетов. Необходимая метеорологическая информация поступала в штаб управления АВ из Гидрометцентра России и Северо-Западного УГМС.

Организация и проведение метеозащиты Санкт-Петербурга, Ташкента и Казани выявили ряд особенностей, которые необходимо учитывать при выполнении таких работ. В связи с неопределенностью метеорологических условий в задаваемые дни в подготовительный к АВ период должна проводиться подготовка к воздействиям на разнообразные типы облачности — от однослойной до многослойной фронтальной с «затопленной» конвекцией с осадками и без них. Для предотвращения выпадения осадков или снижения их интенсивности использовались специально оборудованные самолеты типа Ил-18 и Ан-12 (Ан-72), проводившие АВ на двух-трех удаленных от мегаполиса рубежах на разных высотах.

Анализ результатов проведенных работ показал, что АВ на облака являются успешными при применении технологий, направленных на пространственное перераспределение осадков — создание «тени» осадков на защищаемом объекте (Шметер, Корнеев, 2000), на их предотвращение путем перезасева (РД 52.11.677—2006, 2006), на разрушение или изменение направления перемещения кучево-дождевого облака (Cb) динамическим методом (Шметер, 1987).

Воздействия осуществлялись с применением технологий, разработанных в Росгидромете и основанных на засеве слоистообразных форм облачности жидким азотом и гранулированной твердой углекислотой, йодистым серебром, гигроскопическими веществами (Беляев и др., 1996; Довгалюк и др., 1998). Для подавления развития кучевых облаков и предотвращения ливневых осадков производился засев облаков дозированными порциями порошкообразного реагента (цемента марки М-500), инициирующим в облаках нисходящие движения (Качурин, 1990; РД 52.04.11.678—2006, 2006).

## 1. Активные воздействия на слоисто-дождевую облачность

В Санкт-Петербурге, Казани и Ташкенте АВ проводились преимущественно на слоисто-дождевые облака (Ns), наблюдаемые на фронтальных разделах воздушных масс.

Рассмотрим проведение АВ в дни празднования 300-летия Санкт-Петербурга 30—31 мая 2003 г. В конце мая 2003 г. на северо-западе европейской части России сформировались следующие синоптические условия: высокий малоподвижный циклон с центром над Новой Землей создавал условия для выхода других циклонов с Атлантики на Северную Европу. Над Финским заливом наблюдался западный, северо-западный перенос со скоростью ветра 10—15 м/с на высоте 3 км и 20—25 м/с на высоте 5 км. По прогнозу Санкт-Петербургского Гидрометцентра 30 мая на территории Петербурга ожидался дождь, 31 мая — кратковременные ливневые дожди.

Утром 30 мая к Санкт-Петербургу приблизился циклон, образовавшийся над Атлантикой севернее Англии. Циклон смещался к востоку со скоростью 35—40 км/ч. Днем 30 мая 2003 г. Санкт-Петербург находился под влиянием фронтальной системы, состоящей из быстро окклюдирующихся теплого и холодного фронтов. Проходя над Балтикой, фронтальная система обострилась. С нею было связано обширное поле слоисто-дождевых облаков с осадками.

31 мая 2003 г. над Скандинавией несколько южнее 60° с. ш. на холодном фронте циклона образовалось волновое возмущение, смещавшееся на восток со скоростью 50 км/ч. Во второй половине дня центр волны располагался над Чудским озером, фронтальная слоисто-дождевая облачность со слабыми дождями — над Финским заливом и Санкт-Петербургом. Днем фронтальная облачность получила дополнительное конвективное развитие.

30 мая АВ на фронтальные облака (As и Ns) производились с целью вызывания преждевременного выпадения осадков до подхода облачности к Санкт-Петербургу. Для этого осуществлялся одновременный засев облаков твердой углекислотой и жидким азотом вдоль трех удаленных рубежей длиной до 50 км, расположенных перпендикулярно к направлению смещения облаков с запада. Первый, второй и третий рубежи находились на расстоянии

30—35, 50—55 и 75—85 км соответственно. На каждом рубеже АВ осуществлялись двумя самолетами, разнесенными по высоте на 300—600 м, как правило, внутри облачности. Нормы расхода реагентов выбирались таким образом, чтобы на каждом из трех рубежей суммарное количество вводимой в облака углекислоты (сухой лед) составляло 3 кг и жидкого азота — 200—300 г на километр пути (Щукин и др., 2004). Всего 30 мая 2003 г. было выполнено восемь полетов самолетов с общим временем налета 42 ч 35 м.

Для обеспечения АВ использовались данные двух МРЛ-5 (МРЛ-5 № 1 — Санкт-Петербург и № 2 — Воейково), работающих на  $\lambda = 3,2$  см и удаленных друг от друга на расстояние  $\sim 30$  км. МРЛ-5 № 1 совмещал данные с результатами наблюдений ближайшего МРЛ, принадлежавшего Финляндии (Щукин и др., 2004). Анализировались следующие параметры радиоэха: интенсивность осадков ( $I$ ), высота верхней границы радиоэха ( $H$ ) и значение радиолокационной отражаемости ( $Z$ ), которые измерялись в периоды подготовки и проведения АВ. Принимались во внимание результаты измерений  $I$  и  $H$  контрольных дождевых очагов, движущихся с запада на восток севернее и южнее зоны воздействий.

Из анализа полученных данных следует, что 30 мая 2003 г. на расстоянии 100—150 км к западу от Санкт-Петербурга до начала АВ интенсивность дождя и высота верхней границы облаков радиоэха постепенно уменьшались от 2,7 мм/ч и 4,6 км соответственно в 11 ч до 0 мм/ч и 0 км в 14 ч 50 мин. После начала в 14 ч 50 мин АВ в облаках образовался большой просвет. Затем в район АВ пришел новый массив дождевых облаков ( $I = 0,1$  мм/ч и  $H = 1,7$  км), который в результате АВ был рассеян к 19 ч. В целом для района Санкт-Петербурга в результате АВ интенсивность осадков удалось уменьшить в семь раз, а высоту радиоэха — от 3,4 до 1,7 км.

31 мая 2003 г. на экране монитора МРЛ-5 № 1 с 8 до 11 ч радиоэхо метеообъектов в радиусе 200 км отсутствовали, хотя на объединенной карте с финским МРЛ прослеживались две зоны осадков по азимутам 280 и 250° на удалении от Хельсинки 150 и 100 км соответственно. Горизонтальные размеры этих зон в радиальном направлении составляли 70—80 км, а в тангенциальном — около 50 км.



В 15 ч 15 мин МРЛ-5 № 1 обнаружил на расстоянии 120—130 км к западу от Санкт-Петербурга зону дождевых облаков с радиальными размерами 40—60 км и высотой верхней границы радиоэха ~5,5 км. Скорость смещения зоны в сторону города равнялась ~50 км/ч. Интенсивность дождя в зоне составляла 4—5 мм/ч (умеренный дождь). Воздействия с самолетов начали проводиться в 15 ч 15 мин на расстоянии от 50 до 130 км в западном направлении. Через час после начала АВ в их районе значения  $I$  и  $H$  заметно увеличились, что вполне объяснимо (Шукин и др., 2004). В 17 ч 20 мин значения  $I$  и  $H$  уменьшились и составили 0,2 мм/ч и 2 км соответственно. В дальнейшем имело место рассеяние облачности и ослабление дождя, а в 18 ч осадки в районе АВ прекратились.

В результате АВ, проведенных 30 мая 2003 г., среднее значение  $\bar{Z}_{\text{макс}}$  вдоль линии запад—восток стало меньше северных значений  $\bar{Z}_{\text{макс}}$  в 1,3 раза, а для южных — в 3,8 раза. В результате работ, проведенных 31 мая 2003 г., произошло соответствующее уменьшение  $\bar{Z}_{\text{макс}}$  примерно в 2,9—2,8 раза, что позволяет сделать вывод об успешности воздействий 30 и 31 мая 2003 г. (Шукин и др., 2004).

## 2. Активные воздействия на конвективную облачность

АВ на конвективные облака проводились при метеозащите в Казани (30—31 августа 2005 г.), в Санкт-Петербурге (23—24 июня 2006 г.) и в дни встречи глав государств с 15 по 17 июля 2006 г.

Известно, что сформировавшиеся кучево-дождевые облака (Cb) состоят из одной или нескольких (до десяти) конвективных ячеек, верхняя граница которых может достигать тропопаузы, а в отдельных случаях, преодолев тропопаузу, располагается в нижней стратосфере. Для образования облаков Cb необходимы высокая влажность в пограничном слое, термическая или динамическая конвекция (Довгалюк и др., 1998).

Конвективное облако возникает как одноячейковое, но на некотором расстоянии от него появляются дочерние ячейки в виде

*Cu cong.* Формирование новых ячеек происходит в результате вынужденного подъема воздуха перед предшествующей уже сформировавшейся ячейкой. Скорость горизонтального переноса хорошо развитых по вертикали ячеек, превышает скорость вновь возникших ячеек, и поэтому первичная ячейка догоняет вторичную и сливается с ней, что приводит к резкому усилению осадков (Шметер, 1987).

Существуют несколько способов предотвратить выпадения осадков из облаков кучево-дождевых форм. Первоначально, используя грубодисперсные порошки, возможно подавить образовавшееся первичное конвективное облако в течение 15—20 мин, когда запасы энергии неустойчивости невелики. Если это сделать не удалось, существует возможность изменить траекторию мультячейкового облака, отклонив ее вправо или влево от среднего потока. Возможность таких изменений траектории *Cb* вытекает из того, что интенсивность облачной конвекции тем больше, чем большее количество скрытой теплоты конденсации выделяется. Стимулируется этот процесс засевом гигроскопическими реагентами справа или слева от направления движения «материнской» ячейки (Шметер, 1987).

### **3. Метеозащита Казани 30 августа 2005 г.**

Для создания благоприятных условий погоды в день празднования 1000-летнего юбилея Казани и 15-летия Республики Татарстан 30 августа 2005 г. АВ производились с 9 ч в радиусе до 80 км от города.

Блокирующий антициклон, длительный период определявший сухую малооблачную погоду в Казани, с 29 августа начал ослабевать и смещаться в восточном направлении. Малоподвижный фронт, расположенный в районе Нижнего Новгорода, постепенно стал перемещаться в сторону Республики Татарстан. По прогнозу Казанского ГМЦ на территории Республики Татарстан со второй половины дня 29 августа ожидалось небольшие кратковременные осадки. Фактически 30 августа ливневые осадки начались в 1ч 40 мин местного времени в районе метеостанции

Казань-Сокол и продолжались в Республике Татарстан в течение всего дня 30 августа.

Для предотвращения развития кучево-дождевых облаков, а следовательно, выпадения осадков использовался динамический способ прерывания их роста, т. е. искусственное создание в растущем облаке нисходящего воздушного потока, который компенсирует в нем восходящий поток и тем самым приводит к замедлению и остановке развития облака. Для этого в растущую вершину облака сбрасывалась с самолета над верхней границей облака определенная порция грубодисперсного порошка, который в процессе гравитационного падения увлекал за собой частицы воздуха, приводя к образованию в облаке упорядоченного нисходящего потока.

При проведении АВ были задействованы самолеты Ан-12, снаряженные необходимым запасом картонных упаковок с порциями по 20—30 кг грубодисперсного порошка (цемента). В случае развития в натекающем на территорию Казани слое изолированных конвективных облаков и их переходом в достаточно мощные формы с вероятным образованием осадков выполнялся засев всех облаков, верхняя граница которых по мере их роста превышала заданный уровень (около 5 км).

То же самое относилось и к конвективным облакам, развивающимся в толще слоистообразных облаков. При этом обнаружение зон затопленной конвекции на фоне слоистообразных облаков уточнялось визуально с борта самолета по факту наблюдения характерных шапкообразных клубящихся облачных вершин над относительно ровной верхней поверхностью слоистообразных облаков. Эффект воздействия на растущие конвективные облака легко обнаруживался визуально по прекращению роста и последующей диссипации обработанной облачной вершины.

В соответствии с приземными картами погоды и картами барической топографии атмосферный фронт располагался в седловине, и было трудно оценить выраженный ведущий поток в районе АВ. В связи с этим перед началом АВ 30 августа в процессе набора высоты самолет проводил зондирование атмосферы с целью определения скорости и направления ветра

через каждые 500 м до высоты 6000 м. При этом одновременно определялась высота изотерм 0 и  $-10^{\circ}\text{C}$ .

В связи с прохождением атмосферного фронта существенно изменились параметры атмосферы, полученные по данным радиозондирования за 3 ч местного времени. Так, например, по данным радиозондирования изотерма  $0^{\circ}\text{C}$  располагалась на высоте 3900 м, а по данным первого взлетевшего борта — на высоте 2300 м. Самолетным зондированием было установлено, что изотерма  $-10^{\circ}\text{C}$  расположена на высоте 3800 м. На основании этих данных были скорректированы высоты работ самолетов по АВ на облачные системы, выбор реагентов, нормы их расхода, продолжительность воздействия.

Обобщая результаты проведенной работы по метеозащите Казани, отметим следующее.

30 августа 2005 г. к моменту начала АВ над Казанью и ее окрестностями проходил окклюдированный фронт, с которым были связаны обложные и ливневые осадки. АВ на облака одновременно проводились на дальних подступах к городу (60—80 км) с целью вызвать интенсивное выпадение осадков и в непосредственной близости от города (10—20 км) с целью подавления процесса осадкообразования.

В результате АВ с 10 ч было достигнуто полное прекращение осадков в черте города. В течение дня над городом наблюдалась облачность 8—10 баллов различных форм без выпадения осадков. К 24 ч облачность уменьшилась до 2—3 баллов. За 30 августа по данным метеостанций к северу от города (а/п Казань-Борисоглебское) выпало свыше 7,7 мм осадков, на юге от города — до 5 мм, на востоке — до 6 мм. В центре города количество осадков составило 0,5 мм в период с 1ч 40 мин до 9ч 53 мин.

По данным аэровизуальных наблюдений в местах внесения реагента через 10—15 мин после АВ отмечались рассеяние облачности и появление зон просвета.

По данным МРЛ-2 и бортовых наблюдений зафиксировано появление просветов во фронтальной облачности, которая восстановилась после прохождения защищаемой территории и прекращения АВ.

**4. Активные воздействия в период проведения  
в Санкт-Петербурге праздника «Алые паруса»  
23—24 июня 2006 г.**

В дни праздника было задействовано шесть самолетов — один самолет-метеолaborатория Ил-18 и пять самолетов воздействия (один Ил-18 и четыре Ан-12).

В районе Санкт-Петербурга погода во второй половине дня 23 июня и в ночь с 23 на 24 июня была обусловлена прохождением холодного фронта. Приземная линия фронта прошла через Санкт-Петербург 23 июня около 17 ч. При этом температура воздуха понизилась с 29—30 до 21 °С. Прохождение фронта сопровождалось грозами и ливневыми осадками. Высота кучево-дождевых облаков достигала 9—11 км, причем постоянно происходило образование ячеек таких облаков, смещавшихся вдоль фронта в направлении северо-северо-восток со скоростью 40—50 км/ч. Наиболее интенсивные кластеры Сб наблюдались к юго-юго-западу от Санкт-Петербурга 23 июня с 20 до 23 ч. Общая ширина фронтальной облачной системы составляла порядка 250—300 км с отдельными «затопленными» конвективными ячейками.

АВ на облака с целью их рассеяния и уменьшения количества осадков были начаты 23 июня в 20 ч 40 мин путем подавления развития динамической конвекции во фронтальной зоне. Для этого самолеты осуществляли засев облаков грубодисперсным порошком и жидким азотом. К 21 ч 23 июня осадки в городе прекратились, а в 2 ч 24 июня облачность над защищаемой территорией была полностью рассеяна. Работы по воздействиям были закончены в 3 ч 15 мин 24 июня в связи с прекращением выпадения осадков в радиусе 150—200 км по данным МРЛ-5.

**5. Активные воздействия, проводимые в дни встречи глав  
государств «Большой восьмерки» с 15 по 17 июля 2006 г.**

Утром 15 июля 2006 г. зона облаков холодного фронта на экране МРЛ-5 прослеживалась в ЮЗ и СВ секторах и смещалась с ЮЗ на СВ через Санкт-Петербург. В ЮЗ секторе на экране МРЛ-5 радиоэхo облачного массива прослеживалось на удалении до 150 км.

Высота верхней границы слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаков на фронтальном разделе достигала 7 км.

Работы по АВ на фронтальные облака проводилась в южном секторе на удалении 60—70 км от Санкт-Петербурга тремя самолетами типа Ил-18 с 9 ч 40 мин до 11 ч 50 мин. В результате АВ на верхнюю границу облачного массива к 10 ч его высота уменьшилась до 5 км.

К 12 ч, когда работы по АВ были приостановлены, облака, смещавшиеся на защищаемую территорию, частично рассеялись; отдельные гряды облаков без выпадающих осадков прошли восточнее Санкт-Петербурга. В результате выпадение осадков в Санкт-Петербурге было полностью предотвращено. После 14 ч произошло растекание фронтальной облачности.

16 июля 2006 г. район работ находился под влиянием циклона, сформировавшегося над Прибалтикой на высоте 3—5 км. Работы по засеву фронтальных конвективных и слоисто-дождевых облаков с элементами внедренной конвекции выполнялись по методике разрушения осадкообразующего облачного слоя и подавления развития конвективной облачности и внедренных во фронтальную облачность конвективных ячеек. Для этого самолеты осуществляли засев облаков твердой углекислотой и грубодисперсным порошком вдоль рубежей АВ длиной 30—50 км.

Линии засева выбирались перпендикулярно вектору ветрового перемещения облачности и располагались на разных (30—60 км) удалениях от защищаемой территории.

Сброс упаковок грубодисперсного порошка осуществлялся из расчета две-три упаковки на облачную ячейку.

В связи с изменением траектории циклона и появлением облачности к северо-востоку от города в 13 ч в Центре управления летными работами было принято решение о перегруппировке самолетов и их размещении на других рубежах. В соответствии с новой схемой воздействий два самолета должны были работать на дальних подступах к объекту — на удалении 60—100 км к северо-востоку от города, а один самолет — в непосредственной близости к границам города, на удалении 40 км, с целью подавления возникающих в этой зоне конвективных ячеек.

До 15 ч воздействия в основном проводились на конвективные ячейки, которые образовывались на удалении от 60 до 100 км и перемещались к Санкт-Петербургу со скоростью 30 — 40 км/ч. В результате воздействия они разрушались, не доходя до защищаемого объекта.

После 15 ч скорость перемещения конвективных ячеек возросла до 50—60 км/ч. В связи с этим продолжительность АВ на эти ячейки до их входа в запретную для полетов самолетов зону сократилась до 10—15 мин, что было недостаточно для полного подавления их развития. К тому же, перемещаясь, ячейки выходили на акваторию Финского залива, которая к этому времени заметно прогрелась, что приводило к существенному усилению конвекции в проходящих над ней облачных ячейках. Этот процесс значительно интенсифицировался при смещении облаков с водной поверхности на сушу.

Анализируя радиолокационные данные о высоте верхней границы конвективных ячеек и интенсивности выпадающих из них осадков, можно заключить, что после проведенного на них воздействия интенсивность осадков уменьшилась. Вполне очевидно, что при наличии возможности продолжения воздействий выпадение осадков из ячейки было бы исключено или же значительно ослаблено.

До 20 ч воздействия по-прежнему проводились на двух рубежах — на ближнем и дальнем. Затем, с развитием мощных конвективных облачных кластеров в непосредственной близости от города к северу, все самолеты были переведены в ближнюю зону. Радиолокационные наблюдения за облачностью и осадками при проведении засева облачности отчетливо иллюстрируют ее реакцию на засев, выражавшуюся в уменьшении высоты верхней границы и последующей диссипации облаков в зонах засева с прекращением осадков.

Авиационные работы по АВ 17 июля 2006 г. были начаты с 6 ч. В этот день последовательно было поднято девять самолетов. Работы по воздействию на облака проводились с 7 ч 30 мин до 15 ч с использованием твердой углекислоты, жидкого азота и упаковок с грубодисперсным реагентом. Задачей воздействий было предот-

вращение (уменьшение интенсивности) выпадения осадков из облачных систем, надвигающихся на территорию Санкт-Петербурга.

В результате проведенных работ с 7 ч 30 мин до 12 ч 30 мин на территории Санкт-Петербурга и района Стрельны количество осадков было уменьшено в 3—4 раз, а в период с 12 ч 30 мин до 15 ч выпадение осадков над защищаемой территорией полностью прекратилось (Айсин и др., 2007).

Поле осадков, связанное с фронтальной облачной системой, приближавшейся к Санкт-Петербургу 17 июля, иллюстрируется радиолокационными картами распределения высоты верхней границы облаков и интенсивности осадков за 11 ч 20 мин (рис. 1, 2).

Из рис. 1 видно, что в районе Санкт-Петербурга располагается зона сплошной облачности. На рис. 2 в центре этой зоны отчетливо видна зона отсутствия осадков, образовавшаяся в результате засева облаков реагентами.

После проведения воздействий наблюдалось либо полное прекращение осадков, либо уменьшение их интенсивности в 5—10 раз, а также имело место уменьшение площади облачного массива и высоты верхней границы облаков при прохождении их над Санкт-Петербургом. К 12 ч 20 мин наблюдалось полное прекращение выпадения осадков из надвигающейся на город облачности.

#### **6. Активные воздействия с целью тушения лесных пожаров искусственно вызванными осадками**

Охрана лесов от пожаров является одной из важнейших природоохранных задач Российской Федерации. Ежегодно пройденные огнем площади исчисляются десятками и сотнями тысяч гектаров. Большинство пожаров, возникающих в таежной зоне Сибири и Дальнего Востока, ликвидировать наземными средствами пожаротушения практически невозможно. Поэтому разработка в ГГО усовершенствованных методов использования искусственно вызванных осадков для тушения лесных пожаров явилась важным шагом в решении этой проблемы (РД 52.04.628—2001, 2001; РД 52.04.674—2006, 2006; Инструкция, 1974).



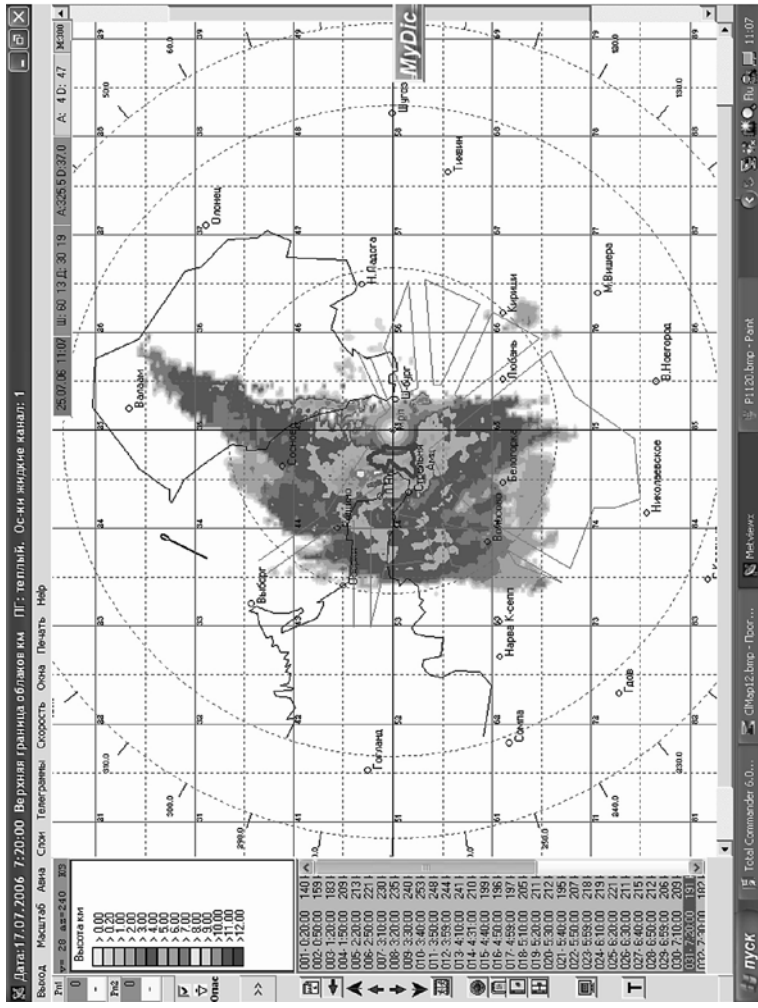


Рис. 1. Радиолокационная карта высоты радиозона верхней границы облаков в 11ч 20 мин местного времени 17 июля 2006 г.



Опытно-производственные работы по тушению лесных пожаров проводятся лесопатрульной авиацией практически во всех субъектах Российской Федерации с использованием йодистого серебра и гигроскопических веществ, генерируемых пиротехническим путем (Инструкция по тушению..., 1974).

Разработанные технологии искусственного вызывания осадков при борьбе с лесными пожарами соответствуют современным требованиям авиационной охраны лесов (РД 52.04.628—2001, 2001; РД 52.04.614—2006, 2006; Козлов и др., 2001). Внедрение этих технологий в оперативно-производственную практику позволило провести успешную ликвидацию лесных пожаров в ряде регионов России.

Технологии искусственного вызывания осадков над очагами лесных пожаров были успешно применены на авиабазах: Сыктывкарская на площади 14 623 га в 2000 г.; Читинская на площади 13 450 га в 2002 г., на площади 128 700 га в 2003 г.; Красноярская на площади 18 350 га в 2003 г. и на площади 19 030 га в 2006 г. Число ликвидированных на территории России пожаров приведено в табл. 1.

Эффективность способа тушения лесных пожаров в значительной степени зависит от применяемых реагентов, достоверности прогноза развития конвективной облачности в районе пожара, правильного выбора рубежа воздействия, определения расхода реагента и других факторов. Существующие методы прогнозирования развития конвективных облаков пока не вполне эффективны для оперативного планирования и проведения АВ на облака для искусственного вызывания осадков.

*Таблица 1*

| <b>Число АВ с целью ликвидации лесных пожаров, включая профилактические, для снижения класса пожароопасности лесов</b> |        |      |        |         |        |      |        |
|--|--------|------|--------|---------|--------|------|--------|
| Год.....   | 2000   | 2001 | 2002   | 2003    | 2004   | 2005 | 2006   |
| Всего воздействий по РФ .....  | 210    | 59   | 111    | 176     | 62     | 27   | 138    |
| Число погашенных пожаров .....   | 104    | 16   | 38     | 112     | 18     | 24   | 30     |
| Площадь, га .....  | 18 079 | 3438 | 20 250 | 148 737 | 20 300 | 2215 | 44 430 |

Разработанные пиротехнические составы позволяют проводить активные воздействия на облака конвективных и неконвективных форм независимо от температуры на уровне верхней и нижней границы облака. Для искусственного вызывания осадков из «теплых» кучевых облаков меньшей мощности может применяться гигроскопический реагент. В ряде случаев засев облака с целью искусственного вызывания осадков гигроскопическими реагентами оказывается эффективнее, чем засев реагентами с йодистым серебром, так как развитие конвективных облаков происходит при положительных температурах (Козлов и др., 2001).

Результаты выполненных в последние годы работ подтверждают перспективность использования искусственно вызываемых осадков для тушения и профилактики лесных пожаров и снижения класса пожароопасности лесов. Однако указанные технологии активных воздействий являются дополнением к существующим методам борьбы с пожарами, используемым авиационными и наземными службами.

#### **7. Активные воздействия на облака с целью инициирования молниевых разрядов**

Особое внимание в последние восемь лет уделялось теоретическим и экспериментальным исследованиям, связанным с инициированием искусственных молний. В известной монографии Качурина (1990) указывается, что можно «разрядить» на Землю грозовое облако до его смещения на охраняемый объект, заставив разряд пройти по искусственно созданному безопасному пути. При этом такой путь может быть создан как наземными техническими средствами, так и высотными.

Так, положительные результаты были получены при выпуске в направлении грозового облака малогабаритной ракеты, подобной противорадовой, которая тянула за собой заземленный проводник (Уман, 2005).

Большое внимание было уделено высотному инициированию молнии из облака на Землю. В связи с этим были осуществлены теоретические оценки изменений напряженности электрического поля ( $E_n$ ) по мере опускания из облака токопроводящего провод-

ника (ТПП), разработана программа эксперимента, определен состав технических средств и выполнены экспериментальные исследования в Ленинградской области. При этом было выполнено следующее:

проведена теоретическая оценка изменений  $E_{\text{п}}$  по мере опускания ТПП различной длины (от 100 до 1000 м) из облака, как из кучево-дождевого (предгрозового), так и из грозового облака;

разработана программа проведения экспериментальных исследований, включающая ежедневное прогнозирование гроз в радиусе 100 км на основе приема традиционной метеоинформации (карт барической топографии, синоптических и прогностических карт; данных зондирования атмосферы, проводимых в п. Воейково; прогноза погоды из СЗ УГМС). Результаты анализа грозовой обстановки в районе и определения момента времени целесообразного проведения АВ на электрическое состояние облака передавались на пункт пуска переоборудованной противогрозовой ракеты (ППГР), условно названный зоной «А» и находящийся относительно МРЛ-5 в азимутальном секторе  $355-2^\circ$  на расстоянии примерно 22—25 км.

на основе прогноза гроз производилась своевременная подготовка радиотехнических средств (РТС) управления такими АВ и контроля результатов этих воздействии.

В состав РТС входили:

автоматизированный метеорадиолокатор МРЛ -5;

однопунктовый грозопеленгатор-дальномер (ОГПД) типа «Алвес» (Снегуров, 2005), фиксирующий в радиусе 50 км координаты молний, компоненты электромагнитного излучения разрядов ( $H_x$ ,  $H_y$  и  $E_z$ ), сигналы времени с точностью до 1 мкс;

приборы для измерения напряженности поля типа «Поле-2» (Имянитов, 1957), размещенные в п. Воейково и в зоне «А»;

Экспериментальные исследования были проведены в августе 2005 и 2009 гг. в Ленинградской области. Наиболее подходящие условия для проведения экспериментов наблюдались 2 августа 2005 г., когда с помощью МРЛ-5 было обнаружено развитие Сб и грозовых облаков. По данным СЗ УГМС район зоны «А» находился в области циклона, центр которого был расположен в Бот-

ническом заливе. Наблюдалось смещение радиоэха облаков с запада на восток, т. е. в направлении зоны «А».

В этот день к 10 ч 36 мин по данным МРЛ-5 облако Сб сместилось в зону «А». Определение принадлежности радиоэха к грозовому в данном эксперименте устанавливалось по косвенному радиолокационному критерию У (РД 52.04.320—91, 1993) и на основе использования данных грозопеленгатора-дальномера.

2 августа 2005 г. в 10 ч 41 мин 20 с, когда облако находилось над зоной «А», была осуществлена доставка в него на высоту 4000 м (высота нижней границы облака 500—800 м) с помощью ППГР четырех ТПП длиной 1000 м, быстро разматывающихся в направлении к земной поверхности, которые вызвали молниевый разряд в 10 ч 41 мин 49,030 с (т. е. примерно через 29 с), зафиксированный ОГПД по азимуту расположения зоны «А» относительно п. Воейково, т. е. по азимуту  $A = 357^\circ$  (табл. 2). В качестве примера в таблице приводятся данные ОГПД как до пуска ППГР, так и в момент возникновения молнии.

Таблица 2

Результаты регистрации молниевых разрядов ОГПД «Алвес»  
2 августа 2005 г. в п. Воейково на базе НИЦ ДЗА

| Время по Гринвичу,<br>ч:мин:с | $E_z$ | Азимут,<br>град. | Даль-<br>ность, км | Примечание   |
|-------------------------------|-------|------------------|--------------------|--|
| 10:39:40,170                  | -157  | 91               | >50                |  |
| 10:39:40,830                  | 90    | 93               | 39,1               |  |
| 10:39:55,720                  | -19   | 167              | >50                |  |
| 10:39:57,360                  | -177  | 275              | 18,4               |  |
| 10:39:57,690                  | -258  | 268              | 32,1               |  |
| 10:39:58,080                  | 160   | 105              | 30,3               |  |
| 10:40:05,600                  | 58    | 86               | 49,7               | Азимуты естественных молний до внесения в облако ЭПП |
| 10:40:20,160                  | 65    | 99               | 46,2               |  |
| 10:40:30,540                  | -159  | 91               | 31,1               |  |
| 10:40:47,620                  | -65   | 156              | >50                |  |
| 10:40:49,430                  | 152   | 88               | 35                 |  |
|                               |       |                  |                    |  |

Окончание табл. 2

| Время по Гринвичу,<br>ч:мин:с | $E_z$ | Азимут,<br>град. | Даль-<br>ность, км | Примечание |
|-------------------------------|-------|------------------|--------------------|------------|
| 10:40:59,980                  | 134   | 90               | 35,6               |            |
| 10:41:18,760                  | -96   | 88               | 32,8               |            |
| 10:41:19,040                  | 298   | 89               | 38,3               |            |
| 10:41:23,650                  | 146   | 87               | 34,6               |            |
| 10:41:23,980                  | 79    | 86               | 34,2               |            |
| 10:41:24,310                  | 48    | 90               | >50                |            |

Пуск ППГР в 10 ч 41 мин 20 с

|              |      |     |      |   |
|--------------|------|-----|------|---|
| 10:41:49,030 | 127  | 357 | 29,8 | Возникновение ини-<br>цированной молнии |
| 10:41:58,090 | 124  | 88  | 45,7 |   |
| 10:41:58,800 | 57   | 88  | >50  |   |
| 10:42:08,800 | -137 | 91  | 26,9 | Естественные молнии                     |
| 10:42:09,180 | 319  | 93  | 30,2 |   |
| 10:42:09,510 | 223  | 90  | 28,2 |   |
| 10:42:17,480 | 97   | 83  | 36,4 |   |
| 10:42:20,170 | 59   | 92  | 48,9 |   |
| 10:42:47,800 | 203  | 276 | 23,6 |   |
| 10:42:48,130 | 75   | 92  | 39,6 |   |
| 10:42:48,790 | 123  | 262 | 27,4 |   |
| 10:42:49,120 | 114  | 90  | 38,6 |   |
| 10:42:50,540 | 184  | 90  | 35,7 |   |
| 10:42:50,870 | 84   | 95  | 34,5 |   |
| 10:43:25,420 | -355 | 91  | 22,6 |   |

Таким образом, наблюдения с помощью ОГПД позволили получить следующие результаты:

всего за время наблюдений ОГПД зафиксировано 80 молний, из которых в радиусе до 50 км 72 молнии (90 %);

если учесть, что зона «А» расположена относительно ОГПД в азимутальном секторе  $345 \pm 2^\circ$ , то до возникновения инициированной молнии по азимуту  $A = 357^\circ$  в секторе зоны «А» с 10 ч 30 мин 05,490 с до 10 ч 41 мин 49,030 с молнии ранее не возникли (табл. 3).

Таблица 3

**Азимутальное распределение молний, зафиксированных ОГПД  
до инициирования молнии, с 10 ч 30 мин 05,490 с  
до 10 ч 41 мин 49,030 с**

|                    | От 71<br>до 120 | От 141<br>до 170 | От 251<br>до 290 | Зона «А»<br>от 345 до 2 |
|--------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------|
| А° .....           |                 |                  |                  |                         |
| Число молний ..... | 57              | 3                | 13               | 0                       |
| Доля, % .....      | 78              | 4,1              | 17,8             | 0                       |

Не вызывает сомнения, что появление инициированного молниевое разряда при доставке в облако ЭПП в 10 ч 41 мин 20 с есть результат воздействия на электрическое состояние облака, ибо из табл. 1 видно, что до этого в течение примерно 11 мин, в период развития Сб, молнии в нем не возникали.

Приведенное сравнение показывает, что иницируемая молния возникла за счет создания объемной проводимости в облаке, которая привела к появлению в нем критической напряженности электрического поля в тот момент времени, когда в облаке еще не была достигнута достаточная величина основных его зарядов.

При проведении воздействия на электрическое состояние облака рассматривалось изменение параметров радиоэха облака как до инициирования молнии, так и после него. В частности, изменение высоты радиоэха ( $H_{ВГ}$ ), отражаемости ( $Z$ ) на двух высотах:  $H_3 \approx 5$  км (на этом уровне определяется  $\lg Z_3$  при оценке критерия  $Y$ ) и  $H_1 \approx 1$  км (измерение осадков). Эти результаты приводятся в табл. 4.

Из таблицы видно следующее:

к моменту подачи команды на пуск ППГР с ТПП, т. е. в 10 ч 36 мин, кучево-дождевое облако находилось в предгрозовой стадии развития. Увеличение высоты верхней границы радиоэха было естественным и продолжалось после воздействия до 10 ч 53 мин;

установленные МРЛ-5 параметры радиоэха облака через 40 с после пуска ППГР, т. е. в 10 ч 42 мин, показывают, что это облако с вероятностью 90 % можно отнести к грозовым, но молнии в нем не возникали (известны случаи, когда первая молния в облаке возникала при  $Y = 40...57$ );



Таблица 4

**Результаты определения изменений параметров радиоэха  
кучево-дождевого облака во время проведения эксперимента  
2 августа 2005 г.**

| Параметры<br>радиоэха | Время проведения наблюдений на МРЛ-5, ч:мин |       |       |       |                  |       |       |       |
|-----------------------|---|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|
|                       | 10:01                                       | 10:19 | 10:30 | 10:36 | АВ в<br>10:41:20 | 10:42 | 10:53 | 10:59 |
| $H_{ВГ}$ км           | 5,2   | 6,2   | 6,2   | 7,0   | -                | 9,5   | 11    | 7,5   |
| $\lg Z_3$             | 1,4   | 0,1   | 0,1   | 1,5   | -                | 2,0   | 1,0   | 1,2   |
| $\lg Z_1$             | 1,0   | 2,4   | 2,4   | 1,9   | -                | 3,5   | 0,8   | 2,2   |
| $Y$                   | 7,3   | 0,6   | 0,6   | 10,5  | -                | 19    | 11    | 9     |

через примерно 11 мин после пуска ППГР, несмотря на продолжающееся увеличение высоты верхней границы облака до 11 км, изменилась микроструктура облака, и в частности:

примерно в два раза уменьшилась отражаемость  $\lg Z_3$  на высоте 5,5—6,0 км,

уменьшилась примерно в четыре раза отражаемость осадков, уменьшился примерно в 1,7 раза критерий  $Y$ .

В результате описанных выше исследований были получены следующие результаты:

достигнуто инициирование искусственных молний из кучево-дождевого облака, находящегося в предгрозовой стадии развития, на основе использования верхнего воздействия на электрическое состояние облака посредством опускания из зоны его отрицательного заряда ТПП. Созданная несколькими ТПП зона объемной электрической проводимости образовывалась не от земной поверхности, а непосредственно из облака на высоте расположения изотермы  $-10$  °С, в области которой сосредоточивается отрицательный заряд облака;

при проведении воздействий на электрическое состояние облака электрическим методом (создание объемной электропроводности) была предпринята попытка проанализировать последующее изменение микроструктуры облака на основе определения параметров его радиоэха. Предварительно, на ограниченном объеме

полученных данных, установлено, что не исключено изменение радиолокационных параметров радиоэха облака после введения в него ТПП, что требует проведения дальнейших исследований.

### **Заключение**

1. Сложившаяся в результате многолетних совместных работ кооперация организаций и предприятий Росгидромета и Министерства обороны РФ позволила подготовить и успешно провести сложный комплекс авиационных работ по воздействию на облака в ряде мегаполисов РФ. Работы выполнялись на основе разработанной в Росгидромете технологии АВ на метеорологические процессы с применением экологически безопасных реагентов.

2. Анализ фактических и радиолокационных данных о распределениях полей облачности и осадков в районе Санкт-Петербурга, Казани и Ташкента в результате проведенных работ по улучшению погодных условий позволяет сделать вывод о том, что воздействия действительно привели к существенному уменьшению интенсивности процессов осадкообразования в натекающих на защищаемую территорию облаках и практически полностью исключили выпадение осадков. Несмотря на сложные метеорологические условия и существенные ограничения по выполнению полетов вблизи защищаемых территорий, поставленная задача по улучшению погодных условий была выполнена.

3. Тушение лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками является в настоящее время достаточно эффективным средством и имеет самые широкие перспективы применения в авиационной охране лесов от пожаров. Дальнейшее совершенствование этого способа связано с изучением условий возникновения и развития лесных пожаров в зависимости от метеорологических условий. Целесообразно проводить систематические профилактические работы по снижению класса пожароопасности лесов искусственно вызываемыми осадками с учетом полученных зависимостей.

4. Перспективным направлением метеозащиты мегаполисов является использование для АВ высотных самолетов, усовершенствование сверхкраткосрочного прогноза погодных условий (2—

12 ч) по данным МРЛ и технологий оценки интенсивности осадков на основе привлечения данных МИСЗ и численного моделирования процессов развития облаков и осадков.

5. Инициирование искусственных молний из предгрозовых и грозовых облаков может быть успешным в том случае, если с помощью дистанционных радиотехнических средств проводить предварительное определение электрического состояния облака.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айсин Д. Р., Гальперин С. М., Козлов В. Н., Шукин Г. Г., 2007. Активные воздействия на облака и осадки в Санкт-Петербурге во время проведения саммита «Группы восьми». — Труды ГГО, вып. 556, с. 215—229.

Атабиев М. Д., Имамджанов А. А., Камалов Б. А., Козлов В. Н., Усманов И. У., Шукин Г. Г., 2002. О проведении работ по метеозащите Ташкента 21 марта 2002 г. — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 4 (552), с. 139—151.

Беляев В. П., Берюлев Г. П., Власюк М. П., Данелян Б. Г., Колосков Б. Г., Корнеев В. П., Мельничук Ю. В., Черников А. А., 1996. Активные воздействия на облака и оценка их результатов: опыт работы над Москвой 9 мая 1995 г. — Обзорение прикладной промышленной математики. Сер. Вероятность и статистика, т. 3, вып. 2, с. 149—160.

Довгальюк Ю. А., Оренбургская Е. В., Пирнач А. М., Паламарчук Л. В., Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А., Степаненко В. Д., 1998. Анализ результатов работ по воздействию на облака с целью предотвращения осадков в г. Ленинграде (на примере опыта 7 ноября 1998 г.). — Метеорология и гидрология, № 2, с. 44—53.

Имянитов И. М., 1957. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. — М.: ГИ ТТЛ. — 483 с.

Инструкция по тушению лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков, 1974 / Е. С. Арцыбашев, П. А. Губин, Н. С. Шишкин, Ю. П. Сумин, М. М. Добротворский, Э. П. Давиденко. — Л.: ЛенНИИЛХ. — 30 с.

Качурин Л. Г., 1990. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеиздат. — 463 с.

Козлов В. Н. и др., 2001. Пиротехнический состав для изменения атмосферных условий. Патент № 2179800.

Корнеев В. П., 2002. Разработка и внедрение комплекса самолетных средств воздействия на облака для оперативно-производственных работ / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. РГГМУ. — 23 с.

РД 52.04.628—2001, 2001. Инструкция. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов. — СПб: Гидрометеиздат. — 24 с.

РД 52.11.677—2006, 2006. Методические указания. Проведение работ по искусственному регулированию погодных условий в мегаполисах. — М.: Метеоагентство Росгидромета. — 26 с.

РД 52.11.678—2006, 2006. Методические указания. Проведение работ по искусственному подавлению развития конвективных облаков самолетными средствами воздействия. — М.: Метеоагентство Росгидромета. — 34 с.

РД 52.04.674—2006, 2006. Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров. — М.: Метеоагентство Росгидромета. — 117 с.

РД 52.04.320—91, 1993. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. — СПб: Гидрометеоздат. — 357 с.

Снегуров В. С., 2005. Амплитудный электромагнитный метод определения дальности грозовых разрядов / Прикладная метеорология. — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 6 (554), с. 150—155.

Шметер С. М., 1987. Термодинамика и физика конвективных облаков. — Л.: Гидрометеоздат. — 287 с.

Шметер С. М., Корнеев В. П., 2000. Изменение режима осадков с подветренной стороны от зоны активных воздействий на облака. — Метеорология и гидрология, № 2, с. 35—46.

Щукин Г. Г., Козлов В. Н., Степаненко В. Д., Гальперин С. М., Стасенко В. Н., 2004. Активные воздействия на облачные системы с целью обеспечения благоприятных погодных условий в период празднования 300-летия Санкт-Петербурга 30—31 мая 2003 г. — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 5 (553), с. 143—168.

Uman M., 2005. Lighting Discharge. — Pergamon Press.

УДК 551.594

## ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ПЕЛЕНГАЦИИ ГРОЗ

*В. Н. Морозов, И. Б. Попов, А. В. Снегуров, В. С. Снегуров,  
Л. Г. Соколенко, Я. М. Шварц*

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

Поступила в редакцию 04.03.2009, после доработки 18.09.2009

### Введение

Теоретические исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз, выполненные в ГГО в течение последнего десятилетия, были направлены на развитие работ по моделированию глобальной электрической цепи (ГЭЦ) и процессов электризации в грозовых облаках. Цель экспериментальных работ состояла в совершенствовании атмосферно-электрической сети и создании сети пеленгации гроз.

### 1. Теоретические исследования атмосферного электричества

Рассмотрим вначале задачи, связанные с моделированием глобальной электрической цепи. Эта цепь определяется как система электрических токов, возникающая в атмосфере и пронизывающая нижнюю атмосферу, ионосферу и магнитосферу. Основные положения теории ГЭЦ рассмотрены в работах Haas, Roble (1979), Морозова и др. (2000), Морозова (2005).

Основная проблема, которая возникает при исследовании глобальной электрической цепи, — это проблема ее поддержания, так как вследствие малой, но конечной электрической проводимости нижней атмосферы электрические поля и токи в атмосфере должны затухать за время порядка 10 мин. В связи с этим необходимо рассматривать генераторы электрического поля, су-

ществующие в атмосфере. Как показывают современные исследования, такими генераторами являются грозовые облака экваториальной зоны земного шара (Морозов и др., 2000).

В развитии грозовых облаков (грозовые генераторы) выделяют квазистационарную и молниевую стадии. Первая является стадией установления электрической зарядовой структуры. Вторая характеризуется молниевыми разрядами облако—облако (внутриоблачные разряды) и облако—Земля, характерными для завершающей стадии жизни грозового облака.

Квазистационарная модель ГЭЦ (или модель электрического поля атмосферы) была рассмотрена в работе Морозова (Morozov, 2006), в которой, наряду с грозовыми токовыми генераторами, учитывался конвективный токовый генератор, действующий в пограничном слое атмосферы. В результате расчетов было получено выражение для потенциала ионосферы, определяющего глобальный электрический режим атмосферы, величина которого составляет 300 кВ. Потенциал ионосферы определяется балансом электрических токов, текущих в областях, где присутствуют грозовые источники (токи зарядки), и электрических токов, текущих в областях, где грозовые облака отсутствуют (токи разрядки). Учет конвективных электрических токов, текущих в пограничном слое атмосферы, приводит к вариациям потенциала ионосферы, которые в среднем составляют порядка 10 %.

Влияние молниевых разрядов на ГЭЦ рассматривалось в работах Морозова (2005, 2006) и Франк-Каменецкого и др. (2006). Решение этой задачи основывалось на нестационарном уравнении для потенциала электрического поля атмосферы. Проведенные расчеты показали, что внутриоблачные разряды уменьшают потенциал ионосферы, отрицательные разряды облако—Земля с нижним отрицательным зарядом облака увеличивают потенциал ионосферы, но этот вклад незначителен и составляет примерно 1 % квазистационарного значения потенциала ионосферы.

Проблеме связи ГЭЦ с крупномасштабными системами продольных магнитосферных токов (магнитосферный генератор) посвящены исследования, выполненные специалистами ГГО и

ААНИИ. Магнитосферные токи, текущие в околополярной области, создают разность потенциалов и электрическое поле в ионосфере, в результате чего происходит изменение вариаций электрического поля, вызванных грозowymi облаками (унитарная суточная вариация). Выполненные в работе Морозова и Трошичева (2008) расчеты показали, что характерные значения потенциала электрического поля, возникающего на уровне ионосферы, составляют 75—110 кВ. Это значение должно быть добавлено к потенциалу ионосферы, создаваемому грозами.

Другим генератором, действующим в верхних слоях атмосферы, является ионосферное динамо, возникающее вследствие приливных взаимодействий с земной атмосферой Солнца и Луны. Расчеты, проведенные в работах Грунковой и др. (2003, 2005), показали, что вклад этого генератора в ГЭЦ невелик, так как потенциал ионосферы, создаваемый солнечными приливами, составляет 25 кВ, а изменения напряженности электрического поля у земной поверхности 5—7 В/м при фоновых значениях 100 В/м.

Таким образом, из всего вышеизложенного следует, что основным генератором, поддерживающим электрическое поле атмосферы, являются грозвые облака в их квазистационарной (домолниевой) стадии жизни. Вклад прочих генераторов в вариации электрического поля атмосферы является второстепенным.

Интересна проблема связи ГЭЦ с климатическими моделями, рассматриваемая рядом зарубежных авторов, например связь моделей ГЭЦ с моделями общей циркуляции атмосферы. В работе Морозова и др. (2000) высказывается мысль о том, что рассчитанные в этих моделях скорости ветра, области конвективной неустойчивости, температура, влажность, облачность и другие параметры могли бы быть использованы для развития электрической параметризации в моделях ГЭЦ.

К проблеме моделирования глобальной электрической цепи примыкают задачи моделирования электрического взаимодействия грозвых облаков с окружающей проводящей атмосферой. Расчеты электрических полей и токов, которые создает грозвое облако в атмосфере в догрозвой и молниевой стадиях, важны

как для оценки токового вклада каждого грозового облака в поддержание ГЭЦ, так и для интерпретации таких оптических явлений, как джеты, спрайты, эльвы.

Решению задач первого направления посвящены работы Морозова (2000, 2001а, 2006б), в которых показана существенная зависимость электрического тока, текущего в верхние слои атмосферы, от вертикального профиля электрической проводимости атмосферы. Характерной особенностью работы Морозова (2006б) является расчет скорости уменьшения со временем напряженности электрического поля, создаваемой электрическим зарядом, который остался в облаке после молниевых разряда, в зависимости от расстояния до облака. В работах Морозова (2001б, 2002) в нестационарном приближении рассчитываются электрические поля, создаваемые грозовыми облаками в верхних слоях атмосферы (для высот 50—80 км), для различных конфигураций электрических зарядов грозового облака в послеразрядной стадии и их временная эволюция в процессе диссипации этих зарядов. Такие поля могут играть важную роль в инициировании оптических свечений, наблюдаемых в этих областях: джетов, спрайтов и эльвов. Предполагается, что эти свечения связаны с разрядами двух типов: классическим разрядом и разрядом на убегающих электронах. Для этих двух случаев оцениваются напряженность электрических полей и электрические заряды, которые необходимы для протекания этих процессов. Показана возможность возникновения джетов, спрайтов и эльвов в процессе развития молниевой стадии грозовых облаков.

Обратимся теперь к задаче моделирования процессов электризации в грозовых облаках. В результате работ по численному моделированию процессов электризации в конвективных грозовых облаках подготовлена модель, состоящая из трех блоков: термогидродинамического, микрофизического и блока электризации.

Система уравнений модели (Пачин, 2002) включает:

двумерное нестационарное уравнение, описывающее конвективные движения воздуха в облаке;



уравнения, описывающие эволюцию спектра водяных капель и ледяных частиц за счет конденсации, сублимации, аккреции и коагуляции;

уравнения электродинамики, описывающие зарядение водяных капель и ледяных частиц при их столкновениях с отскоком, и уравнения Пуассона для напряженности электрического поля, описывающие рост поля при разделении в пространстве заряженных частиц при гравитационной седиментации.

Результаты предварительных численных экспериментов, рассмотренные в работе Пачина (2002), продемонстрировали возможность реализации такой модели, несмотря на ее сложность. В модели в качестве механизма электризации рассматривалась электризация при столкновениях с отскоком водяных частиц с ледяными частицами, когда при одном столкновении частицы обмениваются зарядами  $10^{-16}$ — $10^{-17}$  Кл, а заряд большой частицы при столкновениях с мелкими может достигать  $10^{-15}$ — $10^{-14}$  Кл.

Несколько позднее экспериментально был открыт более мощный механизм электризации, а именно электризация при столкновениях с отскоком частиц ледяной фазы: ледяных кристаллов с частицами крупы или града (Морозов, 2006а; Веремей и др., 2006, 2007). При действии этого механизма во время одного столкновения крупной ледяной частице передается заряд  $10^{-14}$ — $10^{-15}$  Кл, а при множественных столкновениях с мелкими ледяными частицами крупная частица может приобретать заряд  $10^{-12}$  Кл. Эффективность этого механизма для генерации электрических полей в грозовых облаках была продемонстрирована в работах Морозова (2002а, 2005а, 2006а). Он также важен для интерпретации данных самолетных измерений напряженности электрического поля облаков (Михайловский, 2002).

Исследование радиоэха молниевых каналов (Гальперин, 2001) указывает на то, что развитие молний связано с областями интенсивной электризации выше нулевой изотермы.

Учет данного механизма в трехмерной численной модели осадкообразующего конвективного облака, работы по созданию которой ведутся под руководством ГГО с 2007 г. (Довгалюк и др., 2008), возможен за счет создания дополнительного блока, моделирующего ледяную фазу облака.

## 2. Экспериментальные исследования в области атмосферного электричества

Эпизодические измерения градиента потенциала  $V'$  электрического поля атмосферы и удельной полярной электрической проводимости  $Lp$ , начатые в начале прошлого века, с 1950-х годов проводятся на сети Росгидромета непрерывно. С 1980 г. измерения электрических характеристик атмосферы включены в систему мониторинга фоновое состояние атмосферы. Получаемые данные являются единственным источником регулярных экспериментально полученных сведений об электрическом состоянии приземного слоя атмосферы. По этим данным определяются изменения  $V'$  и  $Lp$ , обусловленные как промышленными выбросами аэрозолеобразующих газов, так и выбросами радиоактивных веществ при испытаниях ядерного оружия и катастрофе на Чернобыльской АЭС.

На рис. 1 показаны многолетние изменения среднегодовых значений удельной электрической проводимости воздуха  $L$  в окрестностях Петрограда — Ленинграда — Санкт-Петербурга. Высокие значения  $L$  в начале прошлого века, по-видимому, обусловлены небольшими промышленными выбросами. Затем, в период «индустриализации», с развитием промышленности наблюдается уменьшение величины  $L$ . Резкое увеличение величины  $L$  в конце 50-х — начале 60-х годов связано с массовыми ядерными испытаниями и выбросами радиоактивных веществ в атмосферу. В последующий период, до 1985 г., характеризующийся бурным развитием промышленности и увеличением аэрозольного загрязнения атмосферы, происходит уменьшение  $L$ , а затем наблюдается увеличение  $L$ , связанное с сокращением промышленного производства в период «перестройки».

В последнее десятилетие продолжались работы по совершенствованию системы мониторинга электрического состояния атмосферы. Для станций, выполняющих наблюдения за характеристиками атмосферного электричества, был подготовлен новый руководящий документ, регламентирующий проведение наблюдений на сети Росгидромета (Шварц, 2002), разработаны документы по поверке преобразователей измерительных «Поле-2» и

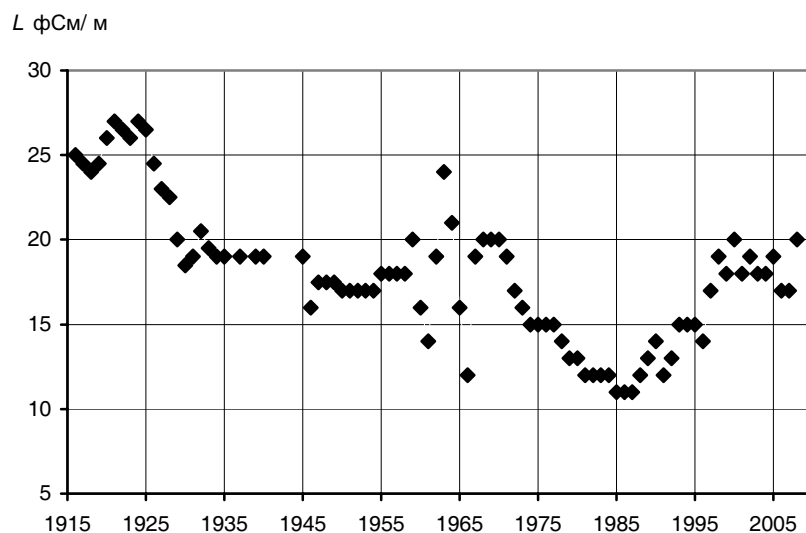


Рис. 1. Вековой ход удельной электрической проводимости воздуха  $L$  вблизи Петрограда—Ленинграда—Санкт-Петербурга.

«Электрорпроводность -2» (Шварц, 2005). Разработано и внесено в Госреестр средство для поверки измерителей  $V'$  КНЭП-1 (рис. 2).

Получаемые на сети данные наблюдений за атмосферным электричеством регулярно заносятся в режимно-справочный банк данных «Атмосферное электричество» и передаются на хранение в Госфонд ВНИИГМИ—МЦД.

Продолжаются исследования влияния крупных источников загрязнения на электрические характеристики атмосферы, и особенно на электрическую проводимость воздуха  $L$  (Русина и др., 2000; Семенов, 1974, 1976; Семенов и др., 1986; Шварц и др., 2003).

Усовершенствованная методика исследований (Попов, 2007) предусматривает совместную обработку данных об удельной электрической проводимости воздуха и метеорологической информации (источник — метеорологическая станция в п. Воейково). При этом проводится расчет среднего трехчасового значения  $L$  по дан-

ным за час до срока метеорологического наблюдения, в срок и через час. Далее данные делились на восемь групп по направлениям ветра, и в расчет брались только периоды наблюдений со скоростью ветра 1—6 м/с. Обработка данных проводилась отдельно для условно теплого (апрель — сентябрь) и холодного (октябрь — март) периода года. Средние значения  $L$  по каждой группе представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что при ветре, направленном от Санкт-Петербурга, величина  $L$  значительно уменьшается. Подобные результаты получены в п. Верхнее Дуброво.

Неравномерное распределение  $L$  по направлениям ветра связано, по-видимому, с приходом разных по загрязнению воздушных масс (рис. 4). В этом примере использованы данные измерений



Рис. 2. Средство поверки КНЭП-1 и преобразователь измерительный «Поле-2», подготовленный к поверке.

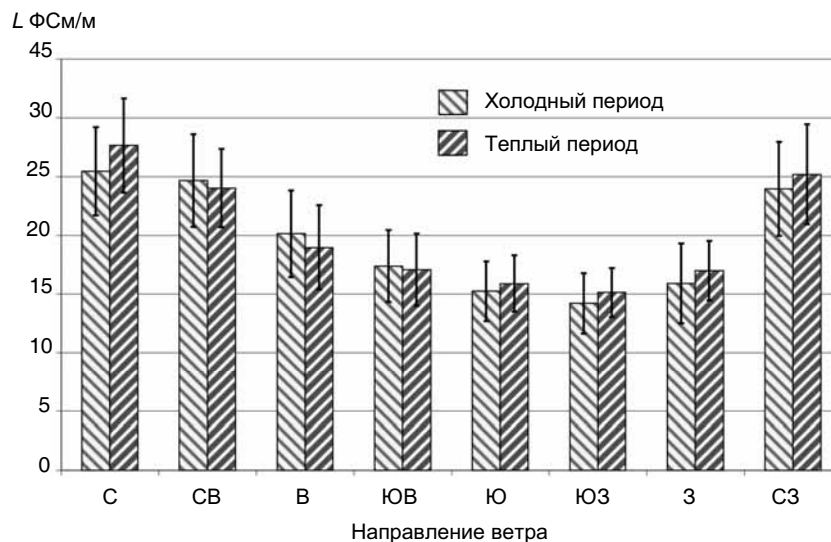


Рис. 3. Средние за период март 1998 г. — март 2007 г. значения удельной проводимости воздуха при различных направлениях ветра в п. Воейково. Отрезками обозначены значения стандартного отклонения.

в п. Воейково и Верхнее Дуброво. В целом результаты работы свидетельствуют о возможности использования данных об электрической проводимости воздуха в задаче мониторинга фонового загрязнения атмосферы. Обработка результатов наблюдений за продолжительный период времени позволяет выделить закономерности регионального характера на фоне локальных факторов: в случае п. Воейково — это влияние Санкт-Петербурга, в случае п. Верхнее Дуброво — это влияние Екатеринбурга.

В результате исследований последних лет (Соколенко и др., 2004) установлены некоторые изменения годового хода  $L$ . Вместо классического континентального годового хода с минимумом зимой и максимумом летом появился характерный провал в летне-осенние месяцы. В последние годы мощным источником аэрозолеобразующих газов стал автомобильный транспорт, интенсивность движения которого увеличивается летом. Это заметно по данным для Воейково и Иркутска.

a)

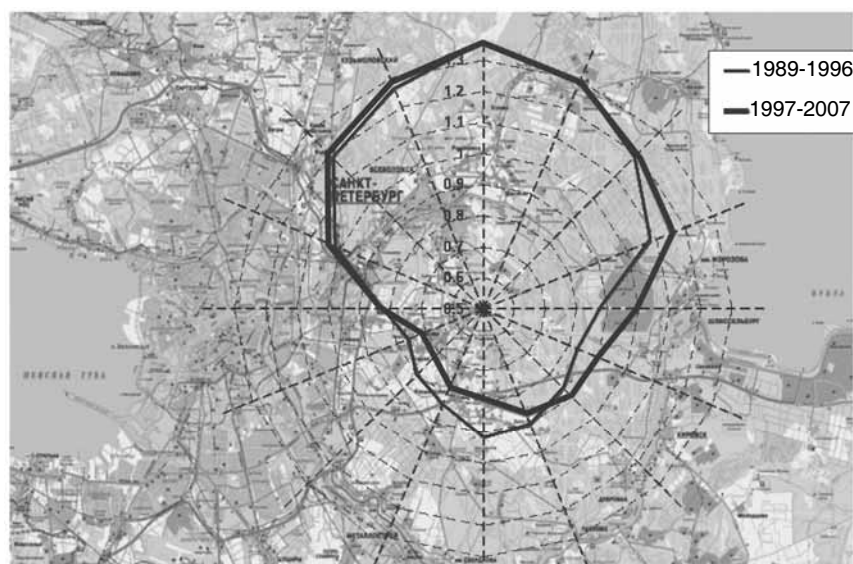
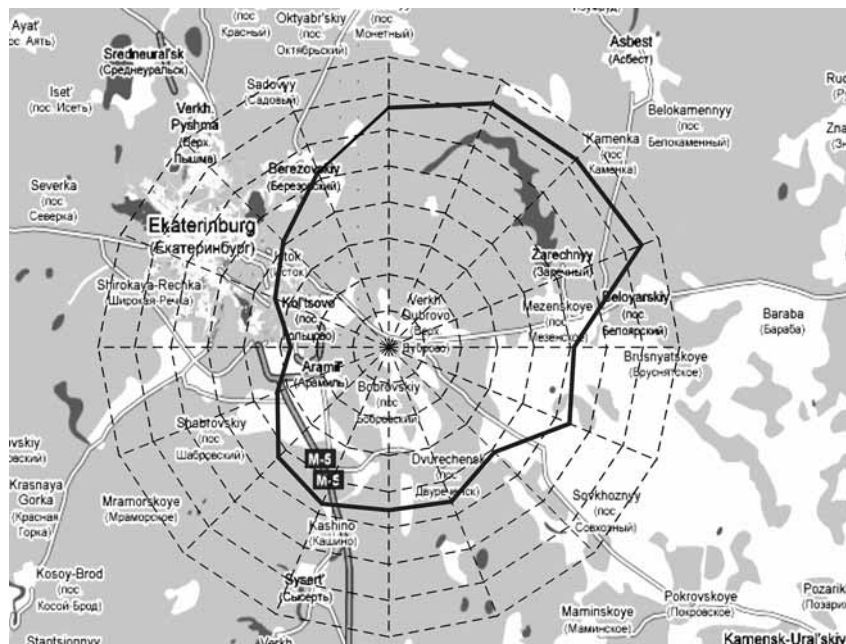


Рис. 4. Зависимость удельной электрической проводимости воздуха  $L$   
 $a$  — результаты измерений в п. Воейково,

На основании данных многолетних наземных измерений градиента потенциала (ГП) атмосферного электрического поля проведены исследования его изменчивости при различных метеорологических явлениях (Попов, 2008). Показано, что при интенсивном выпадении осадков, а также при метелях, дымке и туманах имеет место изменение электрического состояния приземного слоя атмосферы, отражающееся в статистически значимом отклонении ГП в периоды действия указанных явлений от средних значений. Эти сведения используются для усиления медицинского контроля состояния кардиологических больных в неблагоприятные метеорологические периоды.

б)



от направления ветра (относительно среднего значения).

б — в п. Верхнее Дуброво.

В конце XX века специалисты ГГО и санатория «Сестрорецкий курорт» (Морозов и др., 2000) исследовали связь между градиентом потенциала  $V'$  электрического поля атмосферы в приземном слое атмосферы, атмосферным давлением  $P$  и числом обращений за сутки  $M$  за медицинской помощью пациентов с заболеваниями сердечно-сосудистой системы. По данным наблюдений метеорологической станции и пункта наблюдений за атмосферным электричеством в п. Воейково и сведениям о самочувствии пациентов санатория «Сестрорецкий курорт» была установлена статистическая связь случаев значительного падения атмосферного давления  $P$ , появления отрицательных значений  $V'$  и увеличения числа обра-

щений пациентов  $M$ . В дальнейшем было установлено, что в весенне-летний сезон изменение полярности  $V'$  и увеличение  $M$  могут происходить на фоне малых изменений  $P$ .

В последние годы результаты экспериментальных исследований электрических характеристик атмосферы нашли применение в курортной медицине в комплексе показателей. Было показано, что характерное изменение величины  $V'$ , а именно ее резкое уменьшение и изменение полярности, может служить сигналом для начала профилактических мероприятий по предотвращению метеопатических реакций (своевременная профилактика сердечно-сосудистых эпизодов), вызывающих тяжелые последствия. По этой причине исследования связи между  $V'$  и  $M$  в теплое время года и возможности прогнозирования появления отрицательных значений  $V'$  в этот период в последние годы уделялось дополнительное внимание.

Во-первых, был исследован экспериментальный материал одновременных измерений  $V'$  и регистрации  $M$  на протяжении июня—августа 2006 г. Методика измерений и регистрации оставалась прежней (Казакова и др., 2006), а методика обработки была изменена. Для каждого месяца по экспериментальным данным вычислялись вероятность  $P_a$  события  $A$  — появления суток, в течение которых  $M > 4$ , и вероятность  $P_b$  события  $B$  — появления суток, на протяжении которых хотя бы одно среднечасовое значение  $V'$  было отрицательным (в дальнейшем введем для такого значения обозначение  $-V'h$ ). Далее вычислялись вероятности  $P_{ab}$  одновременного осуществления появления событий  $A$  и  $B$  в одни и те же сутки в предположении, что события  $A$  и  $B$  независимы, определялось экспериментальное значение вероятности  $P(ab)$  осуществления событий  $A$  и  $B$  в одни и те же сутки. Оказалось, что  $P(ab)$  значительно больше, чем  $P_{ab}$ . Так, среднее за три месяца значение  $P(ab) = 0,22$ , а среднее значение  $P_{ab} = 0,09$ . Таким образом, подтвердилась ранее установленная статистическая связь между увеличением обращаемости  $M$  кардиологических пациентов санатория «Сестрорецкий курорт» за медицинской помощью и появлением отрицательных значений  $V'$ .

Во-вторых, был выполнен поиск возможностей прогнозирования появления  $-V'h$ . К сожалению, прогнозировать появление



$-V'h$  исключительно по данным о  $V'$  пока что невозможно. В связи с этим следовало попытаться использовать те или иные связи  $V'$  с другими метеорологическими характеристиками или явлениями, которые могут быть спрогнозированы с той или иной степенью надежности. Ранее было замечено, что отрицательные значения  $V'$  появляются при выпадении осадков. Для анализа этой связи были использованы данные пунктов наблюдений за электрическим состоянием приземного слоя атмосферы (четыре пункта на территории России) и метеорологических станций, в состав которых эти пункты входили (Земская и др., 2008). Результаты обработки данных свидетельствуют о высокой вероятности появления  $-V'h$  в дни с относительно продолжительными осадками (более 59 мин) и грозами. Месячные значения этой вероятности находились в пределах 0,8—1,0, медианное значение составило 0,9.

Подобным образом (Казакова и др., 2006; Земская и др., 2008) были исследованы соответствующие данные метеорологических станций Верхнее Дуброво, Иркутск и аэрологической станции Южно-Сахалинск, включая данные пунктов наблюдений за атмосферным электричеством, входящих в их состав (Соколенко и др., 2007).

Результаты обработки данных приведены в табл. 1, в которой приняты следующие обозначения:

событие  $D$  — число случаев продолжительных дождей (общая продолжительность за сутки более 59 мин) или грозы в течение суток,  $T$  — число суток в месяц с событием  $D$ ;

событие  $F$  — число случаев появления  $-V'h$ ,  $N$  — число суток в месяц с этим событием;

событие  $G$  — число случаев появления  $-V'h$  и продолжительных дождей или грозы в одни и те же сутки,  $L$  — число суток в месяц с этим событием.

Используются данные за один теплый период. Конкретный выбор месяцев определяется исключительно полнотой имеющихся данных.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что вероятность продолжительных дождей или гроз и отрицательных значений  $V'$  в одни и те же сутки (отношение  $L/T$ ) велика по наблюдениям ОГМС Верхнее Дуброво и Иркутск (исключение — август 2006 г.

Таблица 1

Число суток с продолжительными дождями или грозой и  $-V'h$ 

## Верхнее Дуброво

| Собы-<br>тие | Повторяе-<br>мость | V 2006 | VI 2004 | VII 2005 | VIII 2006 | IX 2006 | Все<br>месяцы |
|--------------|--------------------|--------|---------|----------|-----------|---------|---------------|
| <i>D</i>     | <i>T</i> сут       | 7      | 13      | 8        | 8         | 11      | 47            |
|              | <i>L/T</i> %       | 86     | 85      | 88       | 50        | 100     | 83            |
| <i>F</i>     | <i>N</i> сут       | 8      | 14      | 7        | 9         | 15      | 53            |
|              | <i>L/N</i> %       | 75     | 79      | 100      | 44        | 73      | 74            |
| <i>G</i>     | <i>L</i> сут       | 6      | 11      | 7        | 4         | 11      | 39            |

## Иркутск

| Собы-<br>тие | Повторяе-<br>мость | V 2005 | VI 2005 | VII 2005 | VIII 2004 | IX 2005 | Все<br>месяцы |
|--------------|--------------------|--------|---------|----------|-----------|---------|---------------|
|              |                    | 10     | 15      | 15       | 18        | 8       | 66            |
|              | <i>L/T</i> %       | 90     | 87      | 60       | 83        | 75      | 79            |
| <i>F</i>     | <i>N</i> сут       | 11     | 13      | 9        | 16        | 6       | 55            |
|              | <i>L/N</i> %       | 82     | 100     | 100      | 94        | 100     | 95            |
| <i>G</i>     | <i>L</i> сут       | 9      | 13      | 9        | 15        | 6       | 52            |

## Южно-Сахалинск

| Собы-<br>тие | Повторяе-<br>мость | — | VI 2006 | VII 2006 | VIII 2006 | IX 2006 | Все<br>месяцы |
|--------------|--------------------|---|---------|----------|-----------|---------|---------------|
| <i>D</i>     | <i>T</i> сут       | — | 15      | 15       | 15        | 13      | 58            |
|              | <i>L/T</i> %       | — | 70      | 60       | 40        | 69      | 64            |
| <i>F</i>     | <i>N</i> сут       | — | 16      | 10       | 8         | 9       | 43            |
|              | <i>L/N</i> %       | — | 81      | 90       | 75        | 100     | 86            |
| <i>G</i>     | <i>L</i> сут       | — | 13      | 9        | 6         | 9       | 37            |

в Верхнем Дуброво). Однако значения  $L/T$  меньше, чем полученные в п. Воейково (Земская и др., 2008). Значения  $L/T$  для Южно-Сахалинска еще меньше.

Вообще, появление отрицательных значений  $V'$  у поверхности Земли связано с воздействием сформировавшегося генератора электрического поля в тропосфере, действующего противоположно глобальному грозовому генератору, и в частности облачного генератора электрического поля атмосферы, в свою очередь, связанного с появлением осадков. Однако интенсивность действия этого генератора зависит от условий образования облаков и осадков. Можно предположить, что облачный генератор электрического поля атмосферы в Южно-Сахалинске менее активен, чем в Ленинградской области и в районах расположения п. Верхнее Дуброво и Иркутска. Действительно, несмотря на значительное число дней с осадками в Южно-Сахалинске, число дней с грозами в Южно-Сахалинске мало.

Таким образом, показано, что в теплое время года существует возможность предсказания появления отрицательных значений градиента потенциала электрического поля атмосферы у поверхности Земли с использованием краткосрочного прогноза погоды в климатических и географических районах, в которых условия образования облаков и осадков сходны в общих чертах с условиями образования облаков и осадков в Ленинградской области. Следовательно, опыт исследований петербургских курортологов и метеорологов по выявлению неблагоприятных погодных условий (Земская и др., 2008) может быть распространен на другие климатические районы (Соколенко и др., 2007). Этот опыт реализован в санатории «Сестрорецкий курорт» в виде Методических рекомендаций по медицинской классификации погоды, основные черты которых представлены в работе Земской и др. (2008).

В связи с прогнозируемым изменением климата и восстановлением промышленного потенциала РФ возможно изменение электрического состояния приземного слоя атмосферы, поэтому необходимо:

сохранить сеть пунктов измерений  $V'$ ,  $L+$  и  $L-$  в прежнем объеме, а при возможности увеличить число пунктов наблюдений;

усовершенствовать сетевые измерители  $V'$ ,  $L+$  и  $L-$  в соответствии с новыми возможностями и идеями;

обеспечить совместную обработку и анализ данных метеорологических и атмосферно-электрических наблюдений в реальном режиме времени;

восстановить международный обмен данными по приземному атмосферному электричеству.

### **3. Автоматизированная аппаратура пеленгации гроз, методика ее применения**

Основные принципы построения системы штормового оповещения на базе пассивных средств измерения координат молниевых разрядов (МР) изложены в разработанной в ГГО концепции грозопеленгационной сети Росгидромета, которая была одобрена ЦКПМ в декабре 1994 г. (Снегуров, 1997).

Концепция предусматривала создание национальной оперативной многопунктовой пеленгационной сети местопределения гроз (ПСМГ), основанной на использовании методов и средств регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ) МР в сверхдлинноволновом (СДВ) диапазоне. За рубежом такие сети нашли широкое применение. Их описания, тактико-технические данные и результаты измерений излагаются в ряде работ и рекламных проспектов, которые, однако, не позволяют разобраться в деталях технических и методических решений. Например, остаются неясными способы привязки данных измерений к сигналам системы единого времени (GPS), методики выбора характерной точки сигналов ЭМИ МР, методика и алгоритмы расчетов, способ калибровки антенн, что очень важно при расчетах токов молний и т. д. В связи с этим при разработке отечественной системы пеленгации МР авторы самостоятельно искали технические решения и способы получения достоверной информации о МР, их параметрах и местоположении.

Основная трудность в реализации концепции построения ПСМГ в начале 90-х годов состояла в отсутствии доступных, в физическом и материальном смысле, выделенных каналов связи и простых высокоточных средств синхронизации измерений в территориально разнесенных пунктах. В этой связи в концепции

предлагалось на первом этапе развернуть сеть однопунктовых грозопеленгаторов-дальномеров (ОГПД), не требующую линий связи и устройств синхронизации измерений. На втором этапе планировалось объединение ОГПД линиями связи, например, с помощью операторов сотовой связи, обеспечивающих выход в Интернет. Синхронизацию измерений предполагалось осуществлять с помощью приемников навигационной системы GPS.

Первый этап этой работы в силу экономических трудностей реализовать не удалось. За последние годы в результате развития средств связи (внедрение протокола 3G и аппаратуры, обеспечивающей достаточно высокую, до 2 Мб/с, скорость передачи данных), мобильных устройств навигации и измерения времени на базе GPS приемников удалось решить ряд технических и методических задач и значительно продвинуться в направлении построения оперативной ПСМГ. В первую очередь, должны были быть решены следующие задачи:

- разработка простых, надежных и дешевых технических средств регистрации ЭМИ МР, эксплуатируемых в условиях воздействия достаточно высоких, с каждым годом возрастающих, промышленных помех;

- разработка методики и аппаратно-программного обеспечения для привязки сигналов ЭМИ МР к системе единого времени, построенной на базе GPS приемников;

- создание аппаратно-программного комплекса передачи, сбора и обработки оперативной информации, поступающей в реальном времени на центральный сервер с территориально разнесенных пунктов регистрации ЭМИ МР;

- разработка предложений по структуре сети пунктов регистрации ЭМИ МР, так как от их расположения зависит вероятность обнаружения и погрешность определения местоположения МР;

- развертывание экспериментальной грозопеленгационной сети и проверка работоспособности технических и программных средств, методик сбора, обработки и представления данных измерений, структуры базы данных;

- оценка нагрузки на каналы передачи данных и возможных затрат на эксплуатацию сети.

Решением всех этих задач в последнее десятилетие занимались сотрудники отдела атмосферного электричества Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) и ООО «Алвес».

В начале 90-х годов на базе персонального компьютера (ПК) для регистрации источников электромагнитного излучения ЭМИ в СДВ диапазоне был разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) версии «Алвес» (Снегуров 1997). На его основе были созданы ОГПД версии «Алвес 01» и «Алвес 1.1» с широкополосными пеленгаторами (Снегуров, 2005). С 1993 г. первый из них работает в п. Воейково (Огуряева и др. 2001; Снегуров, 2005, Снегуров и др., 2004, 2006а, 2006б, 2007а, 2007б, 2007в, 2007г, 2007д) (в 1999 и 2003 гг. АПК и ОГПД были модернизированы под операционную систему Windows и быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

Опыт эксплуатации АПК и ОГПД показал, возможность их применения в ПСМГ, которые могут использоваться автономно и в составе комплексов мониторинга окружающей среды, и в частности с метеорологическими радиолокаторами МРЛ.

ПСМГ должна обеспечивать решение следующих задач (Снегуров, 1997, 2005; Снегуров и др., 2004):

1. Оперативное обнаружение МР с целью:

определения их пространственно-временных характеристик;  
построения оперативных карт грозовой активности;

оперативного предупреждения служб управления воздушным движением, стартовых комплексов разного назначения, служб обеспечения безопасности эксплуатации пожаро- и взрывоопасных объектов, линий связи, электропередачи и т. д.;

контроля электрического состояния конвективных облаков в естественном цикле и при проведении активных воздействий, в случаях ослабления грозовой активности и инициирования МР различными техническими средствами.

2. Формирование базы данных наблюдений за грозовой деятельностью с целью:

получения режимных (климатических) характеристик грозовой деятельности на контролируемой территории;

обеспечения потенциальных пользователей данными о распределении МР по территории, параметрами их излучения и т. п.

В 2004—2006 гг. на базе ГГО в п. Воейково, метеоподразделениях ЦГМС-Р Санкт-Петербург (г. Тихвин), Псковской (г. Гдов), Новгородской области (г. Новгород) и ОАО «Апатиты» (г. Кировск) Мурманской области при финансовой и научно-технической поддержке ООО «Алвес» была развернута экспериментальная ПСМГ версии «Алвес 3.2.8.01» (Снегуров и др., 2007б). В ней используются индикаторы грозовой опасности версии «Алвес 7.01» (далее по тексту индикаторы), построенные на базе АПК регистрации источников ЭМИ, в частности МР.

С 2006 г. экспериментальная ПСМГ работает в оперативном режиме. Расстояние между пунктами в Воейково, Новгороде, Гдове и Тихвине и Кировском, расположенным в Мурманской области, изменяется от 165 до 338 км и от 874 до 1000 км.

С использованием данных наблюдений ПСМГ была разработана методика сравнения данных наблюдений за грозами с помощью ОГПД, ПСМГ и МРЛ-5 (Снегуров, 2005; Снегуров и др., 2006б, 2007в, 2007г), а также проведена серия работ по определению эффективности распознавания гроз МРЛ-5 в п. Воейково. Показано, что применение средств грозопеленгации совместно с МРЛ позволяет в зависимости от метода пеленгации гроз повысить вероятность распознавания гроз МРЛ-5 на 10—15 и 30—35 % (Снегуров, 2005; Снегуров и др., 2006, 2007в, 2007г). С помощью грозопеленгационных средств контролировались опыты по иницированию молниевых разрядов. В 2007—2008 гг. четырехпунктовая ПСМГ была развернута на космодроме Байконур. С 2008 г. по запросу ЦГМС-Р Санкт-Петербург данные ПСМГ публикуются на сайте ООО «Алвес».

Разработаны предложения и технические задания построения ПСМГ для защиты от грозových перенапряжений централизованных электронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики по трассе Санкт-Петербург—Москва (Манаков и др., 2006) и обеспечения электроэнергетиков информацией о грозах в Сочинском регионе. Опыт эксплуатации экспериментальной ПСМГ позволил проверить ряд технических решений, отработать версии программного обеспечения, сформулировать основные требования к элементам сети, в частности к

индикатору и автоматизированному рабочему месту (АРМ) ПСМГ, включающему центральный сервер и вычислитель.

В ПСМГ могут использоваться пеленгационный и/или разностно-дальномерный методы определения координат источников излучения в СДВ диапазоне (Кононов и др., 1986). Погрешность измерения координат пеленгационным методом зависит от расстояния между пунктами, удаленности источника и погрешности определения азимута (пеленга) пеленгаторами индикаторов в составе ПСМГ. Последняя обусловлена в основном воздействием внешних шумов и «ошибкой пункта», возникающей в результате влияния на магнитные антенны местных предметов, зданий, линий электропередачи, канализационных труб в земле в местах установки антенн.

Серия опытов с использованием имитатора показала, что при соотношении сигнал/шум более семи погрешность измерения пеленга широкополосным пеленгатором не превышает  $2^\circ$ , а при соотношении сигнал/шум более 23  $\text{СКО} < 1^\circ$  (Снегуров и др. 2007б). Погрешность измерения пеленга, превышающая  $2^\circ$ , ограничивает возможности применения пеленгаторов в ПСМГ на расстоянии более 150—200 км. Это связано с тем, что на этих удалениях уменьшается соотношение сигнал/шум и увеличивается погрешность измерения координат МР.

Для уменьшения погрешности измерения координат МР с помощью ПСМГ применяется разностно-дальномерный (гиперболический) метод (Кононов и др., 1986). В нем используется только один компонент  $E_z$  ЭМИ МР. Это в три раза снижает объем информации по рабочим параметрам, передаваемой по линиям связи и сокращает материальные затраты. Применение разностно-дальномерного метода требует точной, до единиц микросекунд, привязки к характерной точке (например, максимума  $E_z$ ) ЭМИ МР, регистрируемого в территориально разнесенных пунктах.

Основным источником погрешности привязки характерной точки к шкале времени на удалениях 300—400 км являются шумы. При увеличении расстояний между пунктами регистрации ЭМИ МР появляются ошибки, связанные с неправильным выбором характерной точки во всех пунктах наблюдений. На удале-



нии более 300—400 км форма ЭМИ МР в СДВ диапазоне трансформируется в результате распространения сигналов в волноводе Земля—ионосфера. Это приводит к случаям, когда индикатор выделяет разные характерные точки. В ближней зоне выделяется максимум амплитуды сигнала на первой полуволне как наибольший, а на расстоянии 1000 км максимум смещается на третью полуволну и разность времени прихода (РВП) сигнала увеличивается на целый период.

Авторами разработана методика привязки атмосфериков к сигналам точного времени, в частности к секундной метке GPS приемника, и обработки данных синхронных измерений. Экспериментально исследованы погрешности привязки к секундной метке характерной точки ЭМИ МР и измерения РВП атмосфериков в зависимости от соотношения полезного сигнала электрической составляющей  $E_z$  и уровня шумов.

В первом случае для определения средней квадратической погрешности привязки волновых форм ЭМИ МР (атмосфериков) к секундной метке системы единого времени (GPS) и ухода времени, связанного с нестабильностью генератора, имитирующего ЭМИ МР и генератора персонального компьютера, к антенне индикатора через емкостный эквивалент антенны подключался генератор импульсов. Измерения проводились для частоты сигналов генератора 5, 10, 20, 40 и 100 Гц. Результаты измерений показали, что на указанных частотах СКО времени привязки к секундной метке GPS приемника изменяется от 0,75 до 1,8 мкс. Уход времени, связанный с нестабильностью тактовой частоты генераторов имитатора и персонального компьютера изменяется от 0,186 до 0,267 мкс за одну секунду. Эта погрешность в 3—10 раз меньше погрешности привязки к секундной метке, и ею можно пренебречь при расчетах координат ЭМИ МР. Погрешность привязки импульса синхронизации GPS приемника к единому времени не превышает 15—20 нс.

Для оценки погрешности привязки характерной точки волновых форм ЭМИ МР (атмосфериков) к секундной метке системы единого времени GPS проводились синхронные наблюдения в одном пункте тремя комплектами индикаторов версии «Алвес 7.01»,

которые в 2007 г. были размещены на космодроме Байконур. В результате были определены значения среднего квадратического отклонения (СКО) РВП атмосфериков для пар индикаторов. Этот параметр определяет взаимную случайную погрешность измерений. В разные дни для разных пар индикаторов СКО РВП изменялось в пределах от 1,56 до 2,91 мкс.

Аналогичные измерения (по дальним грозам) проведены с помощью модернизированных индикаторов версии «Алвес 7.04». СКО изменялось от 1 до 3,06 мкс. Максимальное значение СКО соответствует минимальному соотношению сигнал/шум. В начале 2009 г. индикаторы этой версии сертифицированы.

Преимущество разностно-дальномерного метода заключается в том, что внутри сети погрешность измерения координат источников ЭМИ не зависит от размеров базы (расстояние между пунктами, где установлены индикаторы). Однако зависят от геометрической конфигурации сети погрешности измерения географических координат пунктов ПСМГ и погрешности привязки характерной точки временной формы ЭМИ МР. При значениях СКО РВП, приведенных выше, разностно-дальномерный метод позволяет измерять координаты источника ЭМИ внутри ПСМГ с погрешностью 1—2 км. В табл. 2 приведены погрешности измерения координат ЭМИ МР для трехпунктовой ПСМГ на указанном расстоянии.

Расстояние между пунктами ПСМГ значительно влияет на вероятность (эффективность) обнаружения грозовых разрядов. Для оценки вероятности обнаружения МР в заданном направлении индикаторами ЭМИ МР на частотах от 1—2 до 100—200 кГц воспользуемся формулой (Кононов и др., 1986)

$$P(R) = 0,5(1 - \Phi[(\ln R / R_0) / \sigma]),$$

где  $P(R)$  — вероятность обнаружения ЭМИ МР на расстоянии  $R$ ;  $R_0$  — расстояние, с которого индикатор начинает регистрировать ЭМИ МР;  $\sigma$  — стандартное отклонение, характеризующее разброс амплитуды ЭМИ (составляющей  $E_z$ ) МР в источнике;  $\Phi$  — табличный интеграл вероятности. Результаты вычислений показывают, что при  $\sigma = 6$  дБ (0,5), радиусе обнаружения МР индикато-

Таблица 2

**Распределение погрешностей определения координат МР  
трехпунктовой ПСМГ**

| Расстояние, км | Расстояние, км |     |     |     |     |     |          |          |     |     |     |        |     |
|----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------|----------|-----|-----|-----|--------|-----|
|                | 380            | 360 | 340 | 320 | 300 | 280 | 260      | 240      | 220 | 200 | 180 | 160    | 140 |
| 200            | 2,8            | 2,3 | 2,2 | 2,3 | 2,5 | 2,8 | Воейково |          |     |     |     |        |     |
| 180            | 2,5            | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,9 | 2,2      | 2,8      |     |     |     |        |     |
| 160            | 2,5            | 1,2 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,4      | 1,6      | 2,1 |     |     |        |     |
| 140            | 2,7            | 1,7 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1      | 1,2      | 1,2 | 1,4 |     |        |     |
| 120            | 2,2            | 1,6 | 1,2 | 1,1 | 1   | 1   | 1        | 1        | 1,1 | 1,1 | 1,6 | Тихвин |     |
| 100            | 2,9            | 2,1 | 1,6 | 1,2 | 1,1 | 1   | 0,9      | 0,9      | 1   | 1   | 1,2 | 1,6    | 2,8 |
| 80             | 2,9            | 2,2 | 1,6 | 1,3 | 1,1 | 1   | 0,9      | 0,9      | 1   | 1,1 | 1,3 | 1,7    | 2,4 |
| 60             | 2,3            | 1,7 | 1,3 | 1,1 | 1   | 1   | 1        | 1,1      | 1,2 | 1,4 | 1,8 | 2,4    |     |
| 40             | 2,6            | 2   | 1,5 | 1,2 | 1   | 1   | 1,1      | 1,2      | 1,4 | 1,6 | 2   | 2,6    |     |
| 20             | 2,6            | 1,8 | 1,2 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4      | 1,6      | 1,9 | 2,3 | 2,8 |        |     |
| 0              | 1,5            | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 2   | 2,3 | 2,7      | Новгород |     |     |     |        |     |
| -20            | 2,4            | 2,3 | 2,3 | 2,5 | 2,8 |     |          |          |     |     |     |        |     |

ром  $R_0 = 250$  км и  $R = 100$  км вероятность обнаружения МР  $P(R) = 96$  %. Следовательно, для обнаружения 96 % МР на удалении  $R < 200$  км радиус  $R_0$  обнаружения МР индикатором должен превышать 500 км, а при  $R < 400$  км — составлять не менее 1000 км. Таким образом, при предельных значениях длины базы 300—400 км пороговый уровень индикатора должен обеспечивать регистрацию разрядов с удалений до 1000 км.

Увеличение расстояния между пунктами ПСМГ до 700—1000 км требует увеличения чувствительности приемников индикаторов в 2—2,5 раза и соответствующего увеличения зоны обнаружения до 2—2,5 тыс. км. Это приводит к снижению соотношения сигнал/шум и соответствующему увеличению погрешности измерений координат источников ЭМИ из-за ошибок выделения характерной точки в формах ЭМИ МР и вероятности обнаружения МР.

Опыт эксплуатации экспериментальной ПСМГ в Северо-Западном ФО позволил разработать требования к индикаторам грозовой опасности, определить структуру сети, сформулировать требования к аппаратно-программному обеспечению ПСМГ, апробировать ряд технических решений и программное обеспечение.

Основные тактико-технические показатели индикатора грозовой опасности версии «Алвес 7.01» приведены в табл. 3. Выходной информацией индикатора являются следующие параметры: номер пункта, дата, время регистрации МР, амплитуда электрической составляющей ЭМИ МР, длительность переднего фронта, полярность первой полуволны, длительность первой полуволны, технологическая информация.

Общий объем информации от одного МР не превышает 100 байт.

Таблица 3

**Тактико-технические данные индикатора грозовой опасности**

| Параметр  | Значение                        |
|---|---------------------------------|
| Зона обнаружения источников ЭМИ и МР  | Не менее 1000 км                |
| Средняя квадратическая погрешность привязки волновых форм ЭМИ к секундной метке системы единого времени GPS | Не более 3 мкс                  |
| Режим работы  | Круглосуточный                  |
| Интервал накопления информации  | От 1 с                          |
| Режим включения и работы индикатора   | Автоматический, необслуживаемый |

Версия программы для центрального сервера («Server-Алвес 8.01») обеспечивает:

прием через Интернет по протоколу TCP/IP данных с индикаторов грозовой опасности,

передачу по локальной сети (протокол TCP/IP) данных на вычислитель,

вывод информации (текущих данных) на экран монитора о зарегистрированных МР со всех пунктов регистрации,

вывод на экран информации о статусе пунктов регистрации (программа осуществляет мониторинг состояния пунктов регистрации).

Версия программы вычислителя «Алвес 3.2.8.01» выполняет следующие функции:

принимает данные регистрации в протоколе TCP/IP по локальной сети с центрального сервера,

принимает данные наблюдений в файлах по локальной сети с МРЛ-5 (ПО «Мерком 2.1»),

вычисляет координаты МР,

сохраняет координаты МР и их основных параметров в базе данных,

проводит стыковку данных ПСМГ с МРЛ-5,

отображает данные ПСМГ с МРЛ-5 на экране,

формирует Gif-файлы и передает их на Интернет-сервер,

формирует файлы GRZ.txt со списком координат очагов за 30-минутный интервал и передает их на Интернет-сервер,

отображает архивные данные за заданные интервалы наблюдений,

строит гистограмму распределения числа МР за заданный интервал наблюдений.

Связь территориально разнесенных пунктов регистрации МР с центральным сервером осуществляется через Интернет с помощью операторов сотовой связи. Каналы связи обеспечивают передачу данных измерений со скоростью до 1 Мб/с. Основные показатели АРМ экспериментальной ПСМГ соответствуют приведенным в табл. 4.

В дальнейшем результаты обработки должны записываться на SQL-сервер. В сформированных на нем таблицах должны содержаться следующие исходные данные:

1) условный номер МР (импульса ЭМИ),

2) дата,

3) время регистрации МР (импульса) после синхронизации исходных данных,

Таблица 4

## Тактико-технические данные АРМ ПСМГ

| Параметр   | Значение                        |
|--|---------------------------------|
| Зона обнаружения МР в каждом пункте регистрации ПСМГ   | До 1000 км                      |
| Средняя квадратическая погрешность измерения дальности внутри ПСМГ с базовыми расстояниями до 300—400 км | Не более 2 км                   |
| Вероятность обнаружения МР внутри ПСМГ   | Не менее 90 %                   |
| Режим работы   | Круглосуточный                  |
| Интервал накопления и обновления информации  | От 1 мин                        |
| Расстояние между пунктами*   | Не более 300—400 км             |
| Режим включения и работы АРМ ПСМГ  | Автоматический, необслуживаемый |

\* АРМ ПСМГ включает в себя сервер в центральном пункте, соединенный через Интернет с индикаторами грозовой опасности на четырех и более базовых пунктах.

- 4) координаты источника,
- 5) амплитуда сигнала,
- 6) полярность,
- 7) длительность переднего фронта,
- 8) длительность первой полуволны.

Информация по выделенному каналу связи или через Интернет должна поступать к потребителю.

В перспективе планируется расширение ПСМГ по территории России и построение к 2015 г. национальной сети, которая позволит заменить визуально-слуховой метод обнаружения гроз на сети Росгидромета, повысить информативность систем штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов и систем контроля активных воздействий на электрическое состояние конвективных облаков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Морозов В. Н., 2006. О параметризации микрофизических процессов в численных моделях грозовых 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.
- Гальперин С. М., 2001. К вопросу о совместном использовании грозопенетраторов-дальномеров и РЛС метеорологического назначения. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 3 (549), с. 147—153.
- Грунская Л. В., Морозов В. Н., Ефимов В. А., Гаврилов И. Н., Тарасов А. В., 2003. Лунно-солнечные приливы в электрическом поле атмосферы Земли. — Известия вузов, Физика, № 12, с. 71—77.
- Грунская Л. В., Морозов В. Н., Ефимов В. А., Исакевич В. В., 2005. Электрическое поле приземного слоя в ультранизкочастотном диапазоне. — Известия вузов, Физика, № 8, с. 33—38.
- Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров С. А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Земская Е. Н., Крушатина И. А., Прокофьева Е. В., Шварц Я. М., Щукин Г. Г., 2008. Возможности использования параметров электрического поля атмосферы как «сигнальных» факторов ухудшения самочувствия сердечно-сосудистых больных. — Метеоспектр, № 2, с. 116—120.
- Казакова Л. Н., Крушатина И. А., Шварц Я. М., 2006. Возможности использования данных об электрическом поле атмосферы в прогнозировании неблагоприятных погодных условий. — Погода и биосистемы. Материалы международной конференции. Санкт-Петербург, 11—14 октября 2006 г. — СПб: ЦНИТ «АСТЕРИОН», с. 217—224.
- Кононов И. И., Петренко И. А., Снегуров В. С., 1986. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. — Л.: Гидрометеиздат. — 222 с.
- Манаков А. Д., Снегуров В. С., Снегуров А. В., Шатохин В. А., 2006. Способы защиты от грозовых перенапряжений централизованных электронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики. — Материалы третьей международной научно-практической конференции ТрансЖАТ-2006. — СПб., с. 195—199.
- Морозов В. Н. и др., 2008. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака 1. Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока. — Труды ГГО, вып. 558, с. 102—142.
- Морозов В. Н., Снегуров В. С., Шварц Я. М., 2001. Исследования атмосферного электричества. — Современные исследования Главной геофизической обсерватории, т. 2, с. 203—228.
- Михайловский Ю. П., 2002. Эмпирическая модель электрически активных облаков и возможности для тестирования численной модели. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 4 (552), с. 66—75.

Морозов В. Н., Шварц Я. М., Щукин Г. Г., 2000. Глобальная электрическая цепь: физико-математическое моделирование и регулярные измерения в нижней атмосфере. — В сб.: Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. — М.: ОИФЗ РАН, с. 55—67.

Морозов В. Н., 2002. Расчет электрических полей грозовых облаков, необходимых для инициирования электрических разрядов облако — верхние слои атмосферы. — Геомагнетизм и аэрономия, т. 42, № 1, с. 121—129.

Морозов В. Н., 2005. Модель нестационарного электрического поля в нижней атмосфере. — Геомагнетизм и аэрономия, т. 45, № 2, с. 268—278.

Морозов В. Н., 2006. Влияние молниевых грозовых разрядов на параметры глобальной электрической цепи. — Ученые записки РГГМУ, № 3, с. 22—27.

Морозов В. Н., Трошичев О. А., 2008. Моделирование вариаций полярного атмосферного электрического поля в полярной атмосфере, связанного с магнитосферными продольными токами. — Геомагнетизм и аэрономия, т. 48, № 6, с. 759—769.

Морозов В. Н., 2000. Распределение электрического поля, создаваемого стационарным токовым источником в атмосфере с неоднородной электрической проводимостью. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 2 (548), с. 11—23.

Морозов В. Н., 2001а. Влияние неоднородного распределения электрической проводимости атмосферы на распределение электрического поля, создаваемого меняющейся во времени электрической зарядовой структурой облака. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 3 (549), с. 20—28.

Морозов В. Н., 2001б. Расчеты электростатических полей грозовых облаков, необходимых для инициирования разрядов облако — верхние слои атмосферы. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 3 (549), с. 34—48.

Морозов В. Н., 2002а. К вопросу использования лазеров для регулирования грозовой активности. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 4 (552), с. 19—32.

Морозов В. Н., 2005а. Влияние процессов коагуляции на электризацию при столкновениях ледяных кристаллов с частицами крупы-града. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 6 (554), с. 41—53.

Морозов В. Н., 2005б. Нестационарная модель электрического поля атмосферы. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 6 (554), с. 54—61.

Морозов В. Н., 2006а. Расчет электрических зарядов и полей в электроактивной зоне грозового облака. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 7 (555), с. 35—50.

Морозов В. Н., 2006б. Распределение электрического поля, создаваемого нестационарным током заряжения грозового облака в атмосфере с неоднородной электрической проводимостью. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 7 (555), с. 51—67.

Морозов В. Н., Попов И. Б., 2007. Влияние радиоактивных веществ на электрическую структуру электродного приземного слоя. — В сб.: Труды VI Российской конференции по атмосферному электричеству. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, с. 269—270.



Огуряева Л. В., Снегуров А. В., Снегуров В. С., Щукин Г. Г., 2001. Грозопеленгатор-дальномер для систем метеообеспечения. — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 3 (549), с. 190—199.

Пачин В. А., 2002. Предварительные результаты численных экспериментов по моделированию электризации конвективных облаков. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 4 (552), с. 55—65.

Попов И. Б., Соколенко Л. Г., Михайловский Ю. П., 2007. Использование данных об электрической проводимости воздуха в мониторинге загрязнения атмосферного воздуха. — В сб.: Труды VI Российской конференции по атмосферному электричеству. 1—7 октября 2007 г. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, с. 271—272.

Попов И. Б., 2008. Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы. — Труды ГГО, вып. 558, с. 152—161.

Русина Е. Н., Хлебникова Е. И., Шварц Я. М., 2000. Электрическая проводимость воздуха и ее связь с характеристиками фонового загрязнения атмосферы — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 2 (548), с. 3—10.

Семенов К. А., Шварц Я. М., Жукова М. П., Соколенко Л. Г., Камышанова В. А., 1986. Особенности результатов измерений величин атмосферного электричества в Воейково. — Труды ГГО, вып. 458, с. 3—9.

Семенов К. А., 1974. Влияние локальных условий на элементы атмосферного электричества. — Труды ГГО, вып. 323, с. 109—118.

Семенов К. А., 1976. Связь элементов загрязнения воздуха с атмосферным электричеством. — Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, с. 75—79.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., Щукин Г. Г., 2004. К программе построения грозопеленгационной сети Росгидромета. — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 7 (555), с. 207—222.

Снегуров А. В., 2005. Экспериментальные исследования погрешностей пеленгации грозовых очагов. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. — СПб., изд. ГГО. — 19 с.

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

Снегуров А. В., Снегуров В. С., Шаповалов А. В., Щукин Г. Г., 2006б. Опыт совместных наблюдений за грозами грозопеленгатором-дальномером и метеорологическим радиолокатором. — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 7 (555), с. 139—148.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., 2007а. Особенности изменения амплитудных параметров ЭМИ молний в ближней зоне. — В сб.: Труды VI Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, с. 257—258.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., 2007б. Экспериментальная оценка влияния шумов на погрешность пеленгации грозовых разрядов. — В сб.: Труды VI Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, с. 259—260.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., Щукин Г. Г., 2007в. Радиофизические методы определения грозовой опасности облаков. — В сб.: Труды VI Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, с. 38а—38б.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., Щукин Г. Г., 2007г. Комплексное применение систем местоопределения гроз и МРЛ в метеообеспечении авиации. — Метеоспектр. Вопросы специализированного гидрометеорологического обеспечения, вып. 4, с. 206—213.

Снегуров А. В., Снегуров В. С., 2007д. Особенности изменения амплитудных параметров ЭМИ молний в ближней зоне. — Труды ГГО, вып. 556, с. 230—234.

Снегуров В. С., 1997. Концепция сети пеленгации гроз. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 1 (546), с. 92—104.

Соколенко Л. Г., Шварц Я. М., Ляпина И. Г., 2007. Связь между поведением электрического поля атмосферы и выпадением осадков в теплое время года в разных географических районах. — В сб.: Труды VI Российской конференции по атмосферному электричеству. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, с. 229—230.

Франк-Каменецкий А. В., Трошичев О. А., Морозов В. Н., Барнс Г., Корней Р., 2006. Связь приземного электрического поля в высоких широтах с интенсивными молниевыми разрядами облако—земля, дающими всплески ОНЧ-излучения. — Геомагнетизм и аэронавигация, т. 46, № 3, с. 402—408.

Шварц Я. М., Соколенко Л. Г., 2003. Результаты многолетних измерений градиента потенциала атмосферы и удельных полярных электрических проводимостей воздуха в приземном слое на территории России. — В сб.: Труды V Российской конференции по атмосферному электричеству. — Владимир, с. 133—136.

Шварц Я. М., Соколенко Л. Г., Ваюшина Г. П., Павлов О. М., 2005. Рекомендация. «ГСИ. Преобразователь измерительный «Поле-2». Методика поверки» МИ 2941—2005. ВНИИМС. — 11 с.

Шварц Я. М., Соколенко Л. Г., Вычегжанина М. Е., Рябова Р. Ю., 2002. РД 52.04.168—2001. Руководящий документ. Методические указания. Наблюдения за атмосферным электричеством. — СПб: Гидрометеоиздат. — 58 с.

Шварц Я. М., Соколенко Л. Г., 2004. Мониторинг электрического состояния приземного слоя атмосферы на территории России. — Труды НИЦДЗА (филиал ГГО), вып. 5 (553), с. 169—175.

Haas P. V., Roble R. G., 1979. Quasi-static model of global atmospheric electricity. The Lower atmosphere. — J. Geophys. Res., V.84, No A7, p. 3291—3305.

Morozov V. N., 2006. The influence of convective current generator on the global current. — Nonlinear Processes in Geophysics, V. 13, No. 2, p. 243—246.

УДК 551.576

**О ВОЗМОЖНОСТЯХ И ОСОБЕННОСТЯХ  
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ  
ДОЖДЕЙ С ИСЗ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ РАДИОВОЛН**

*В. Д. Степаненко, В. Н. Емельянова, Ю. А. Довгалюк*

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

Поступила в редакцию 16.02.2009, после доработки 20.08.2009

**Введение**

Для получения информации о дождях, выпадающих в тропических и субтропических областях, в конце 1997 г. был запущен японо-американский искусственный спутник Земли (ИСЗ) TRMM (Kummerow et al., 2000; Heymsfield et al., 2000; Steven M. Bolen, Chandrasekar, 2000). Спутник был запущен на круговую орбиту высотой 300 км с углом наклона к плоскости экватора  $30^\circ$ .

Для определения характеристик дождей в состав бортовой аппаратуры ИСЗ входит метеорадар TRMM, имеющий следующие основные технические параметры: излучаемая мощность импульса  $P_t = 23$  кВт, длина волны — 2,17 см, длительность зондирующего импульса после сжатия в приемнике — 1,7 мкс, ширина диаграммы направленности антенны  $\Theta = 0,7^\circ$ , чувствительность приемника  $P_{\min} = 4,10^{-14}$  Вт, угол сканирования антенны  $\gamma = 17,5^\circ$ .

Геометрическое разрешение радара по горизонтали составляет 4,3 км и по вертикали — 0,25 км — все в надире.

При указанной орбите и выбранном угле сканирования  $\gamma$  в полосе обзора поверхности Земли шириной 220 км получают радиолокационную информацию о дождях, выпадающих в слабо освещенных в метеорологическом отношении районах океанов и земной поверхности.

На борту ИСЗ установлен многоканальный микроволновый радиометр (ТМІ) для обнаружения зон дождей, определения во-

дозапаса облаков, температуры водной поверхности и др., работающий на частотах: 10,7; 19,3; 219,3; 37,0 и 85,5 ГГц. Ширина полосы обзора этого радиометра равняется 760 км. В цитированных работах подробно рассмотрено применение спутниковых СВЧ радиометров для определения водозапаса облаков и интенсивности дождей.

Многоканальный радиометр, работающий в оптическом диапазоне на длинах волн 0,63; 1,67; 3,75; 10,8 и 12,0 мкм, дает информацию о полях облачности, локализованных в полосе обзора 720 км.

Наконец, на борту спутника имеется регистратор молниевых разрядов в грозовых облаках (LIS), позволяющий определять местоположение и число молниевых разрядов в полосе обзора от 30° с. ш. до 30° ю. ш.

На рис. 1 представлены изображения радиоэха кучево-дождевой и грозовой облачности тропического циклона Bonnie, полученные с помощью спутникового радара TRMM и наземного метеорадара.

Из работ Kummerow et al. (2000), Heysfield et al. (2000), Steven M. Bolen, Chandrusecar (2000) следует, что определение интенсивности дождей  $I$  по радиолокационным данным производится путем измерения радиолокационной отражаемости  $Z$  в нижнем слое дождевой зоны с помощью соотношения  $Z-I$  типа  $Z = AI^b$ , в котором  $A$  и  $b$  — параметры, зависящие от микрофизических параметров дождей, их интенсивности, типа осадкообразующих облаков и других факторов.

Многие авторы для определения интенсивности дождей  $I$  используют известное соотношение Маршалла—Пальмера  $Z = 200I^{1,6}$ , где  $Z$  — мм<sup>6</sup>/м<sup>3</sup>,  $I$  — мм/ч. Наиболее изменчив параметр  $A$ . Теоретические оценки максимальных значений относительной погрешности определения мгновенных значений  $I$  проведены в работах Степаненко (1973) и Дадали, Мальбаковой (1969), в которых показано, что погрешности даже без учета ослабления радиоволн ( $\lambda = 2,17$  см) при распространении в облаках и осадках на трассе зондирования могут достигать нескольких сотен процентов.

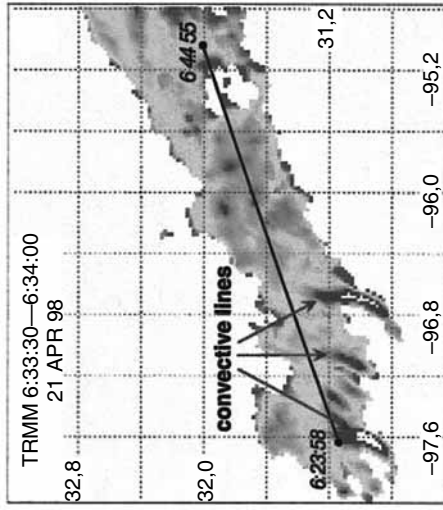
Для спутникового метеородара всегда необходимо учитывать этот вклад, что вносит дополнительные погрешности при определении  $I$ . В работах Heuysfield et al. (2000), Steven M. Bolen, Chandrusecar (2000) предлагается алгоритм для введения поправок на ослабление радиоволн, основанный на усовершенствованном методе Хичфелда—Бордана (Heuysfield et al., 2000) с учетом рекомендаций о применении модельного распределения дождевых капель по размерам. В указанной работе рассматривается также вопрос о влиянии коэффициента заполнения зондирующего импульса частицами облаков и осадков на измеряемые значения  $Z$ . К сожалению, выводы этой работы не содержат сведений о практической успешности применения данного способа учета ослабления радиоволны ( $\lambda = 2,17$  см).

В другой работе (Steven M. Bolen, Chandrusecar, 2000) поправку на ослабление радиоволн предлагается определять, используя эхо-сигналы от подстилающей поверхности. При этом авторы указанной работы справедливо отмечают серьезные трудности, которые необходимо преодолевать. К ним относится неопределенность, связанная с неизвестной величиной эффективной площади рассеяния подстилающей поверхности ( $\sigma_p$ ), над которой выпадают дожди. Величина эффективной площади рассеяния поверхности океанов и морей зависит от степени волнения и угла падения  $\beta$  зондирующего импульса на указанную поверхность. Для суши значения  $\sigma_p$ , кроме того, зависят от типа подстилающей поверхности, сезона года, типа растительности, смоченности участков суши ранее выпавшими дождями и т. д. Нам представляется, что практическое применение этого способа определения величины ослабления рабочей радиоволны спутникового радара TRMM требует серьезного дальнейшего изучения, по результатам которого можно судить о возможностях его применения.

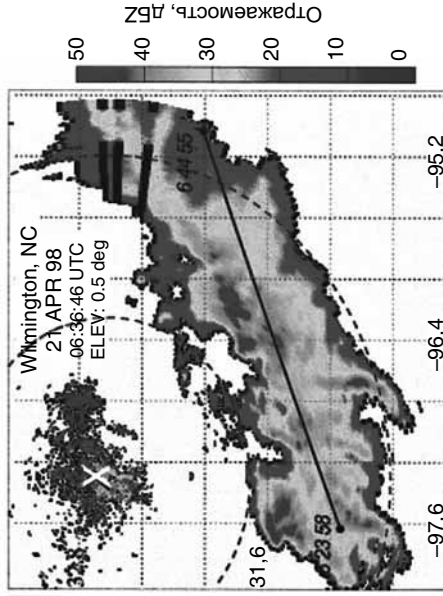
#### **Обоснование возможности определения интенсивности тропических дождей по ослаблению радиоволн**

В настоящей работе в отличие от работ Heuysfield et al. (2000) и Steven M. Bolen, Chandrusecar (2000) рассматриваются возможности способа определения интенсивности дождей, основанного не

a)



b)



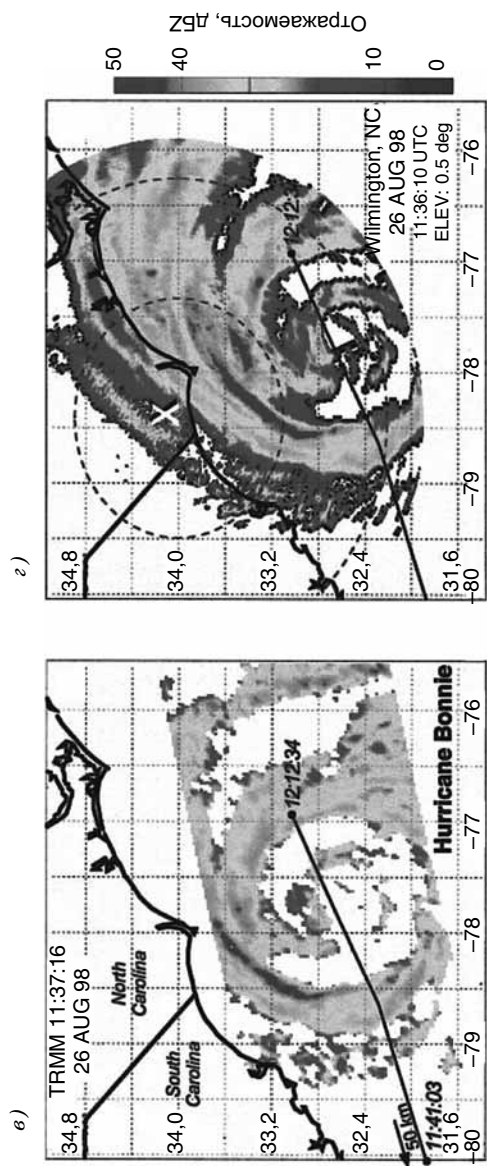


Рис. 1. Радиозо фронтальных кучево-дождевых облаков (а, б) и кучево-дождевых облаков тропического циклона Вонни (в, г).  
 а, в — спутниковая МРЛ; б, г — наземная МРЛ.

на использовании их отражаемости, а на применении корреляционной связи между ослаблением радиоволн и интенсивностью дождей. Эта связь гораздо более тесная, чем связь  $Z$  и  $I$ . Кроме того, в этом случае требуются относительные, а не абсолютные измерения мощности эхо-сигналов и исключается влияние нестабильностей основных технических параметров бортовой радиолокационной станции (РЛС).

Суть рассматриваемого способа определения интенсивности дождя по ослаблению радиоволн ( $\lambda = 2,17$  см) в облаках, осадках и атмосферных газах (в кислороде и водяном паре) заключается в том, что производится регистрация эхо-сигналов от слоев дождя, расположенных на различных высотах ниже уровня нулевой изотермы (например, для ИСЗ TRMM на следующих уровнях: 5 и 0,5 км; 4 и 0,5 км; 3 и 0,5 км; 2 и 0,5 км; 1 и 0,5 км). Как будет показано ниже, значения этих эхо-сигналов позволяют определять средние значения интенсивности дождей  $\bar{I}$  в указанных слоях при известных значениях водности облаков в зоне дождя ниже высоты нулевой изотермы. Выбранные высоты верхней границы слоев дождя — 5, 4 и 3 км — наиболее подходят для зон обзора земной поверхности ИСЗ TRMM (тропические и субтропические районы земного шара с уровнем нулевой изотермы, расположенным высоко над подстилающей поверхностью).

Из основного уравнения радиолокации облаков и осадков (Степаненко, 1973) после его логарифмирования легко получить уравнение для отношения мощности эхо-сигналов от зоны дождя, расположенной на высоте  $H = 5$  км, и зон дождей, расположенных ниже. Это уравнение будет иметь вид:

$$10 \lg \frac{P_1}{P_2} = 10 \lg \frac{Z_1}{Z_2} + 10 \lg \frac{R_2^2}{R_1^2} + 2(R_2 - R_1)[\alpha_r + \alpha_o \bar{w} + \alpha_d \bar{I}], \quad (1)$$

где использовались следующие обозначения:

$Z_1$  — отражаемость дождей на высоте 5 км;

$Z_h$  — отражаемость дождей на выбранном нижнем уровне  $H_h$ ;

$R_1$  — расстояние от спутникового радара до слоя дождя, расположенного на высоте  $H = 5$  км над подстилающей поверхностью (км);



$R_2$  — расстояние от спутникового радара до слоя дождя, расположенного ниже 5 км над земной поверхностью (км);

$\alpha_r$  — коэффициент ослабления ( $\lambda = 2,17$  см) в газах атмосферы (дБ/км);

$\alpha_o$  — удельный коэффициент ослабления волны в облаках  $\left( \frac{\text{дБ/км}}{\text{г/м}^3} \right)$ ;

$\bar{w}$  — средняя водность облаков в выбранных слоях (г/м<sup>3</sup>);

$\bar{I}$  — средняя интенсивность дождя (мм/ч);

$\alpha_d$  — удельный коэффициент ослабления радиоволны в дождях  $\left( \frac{\text{дБ/км}}{\text{мм/ч}} \right)$ .

Решив уравнение (1) относительно интенсивности дождя  $\bar{I}$ , получим следующее соотношение:

$$\bar{I} = \frac{10 \lg \frac{P_1}{P_2} - 2(R_2 - R_1)(\alpha_r + \alpha_o \bar{w}) - 10 \lg \frac{Z_1}{Z_h} - 10 \lg \frac{R_2^2}{R_1^2}}{2(R_2 - R_1)\alpha_d}. \quad (2)$$

При решении уравнения (2) будем полагать, что среднее значение водности зондируемого облака  $\bar{w} = 0,3$  г/м<sup>3</sup>, а в слое ниже высоты нулевой изотермы высота нижней границы облака над поверхностью Земли равна 1 км.

Также будем считать, что при  $\lambda = 2,17$  см

$$\alpha_r = 0,013 \text{ дБ/км}, \quad \alpha_d = 3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{дБ/км}}{\text{мм/ч}}, \quad \alpha_o = 0,1 \frac{\text{дБ/км}}{\text{г/м}^3}.$$

При высоте орбиты ИСЗ TRMM  $H = 300$  км и половинном угле сканирования  $\frac{\gamma}{2} = 8,5^\circ$  величина  $R_1$  (в случае если высота нулевой изотермы в атмосфере равна  $H_0 = 5$  км в надир) будет равна 295 км, а на краю полосы обзора  $R_1 = 303,4$  км.

Для слоя дождя, расположенного на высоте 1,0 км над земной поверхностью,  $R_2 = 299$  км в надир, а на краю полосы обзора  $R_2 = 308$  км.

Другие значения  $R_1$  и  $R_2$  будут находиться в указанных выше пределах.

В соотношении (2) имеется член  $10 \lg \frac{Z_1}{Z_h}$ , который, в принципе, неизвестен. Однако, согласно экспериментальным данным, для дождей, выпадающих из кучево-дождевых облаков, можно считать, что в слое дождя отражаемость и интенсивность незначительно изменяются с высотой над местностью, где дождь сформировался и где он выпадает, т. е.  $Z(h) \approx \text{const}$  и  $I(h) \approx \text{const}$ . Это означает, что  $Z_1 = Z_h$  в слое атмосферы ниже высоты нулевой изотермы. В работах Steven M. Bolen, Chandrusecar (2000) и Степаненко и др. (1983) представлены обобщенные экспериментальные значения  $Z(h)$ , на основании которых получен указанный вывод о том, что  $Z(h) \approx \text{const}$  в рассматриваемых условиях. Тогда в соотношении (2) последнее слагаемое равно нулю, и уравнение можно решать относительно  $I$ .

Возможности определения интенсивности дождей рассматриваемым способом ограничиваются погрешностью измерения отношений эхо-сигналов  $\frac{P_1}{P_2}$ . Заметим, что погрешности измерений этих отношений заметно меньше, чем погрешности измерений абсолютных значений  $P_1$  и  $P_2$ . Поэтому будем полагать, что отношение  $\frac{P_1}{P_2}$  производится с погрешностями 0,5; 1,0 и 2,0 дБ.

Тогда с помощью уравнения (2) можно определить то минимальное пороговое значение интенсивности дождя  $I_{\min}$ , которое может быть определено данным образом. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Известно, что погрешности измерения абсолютных значений мощности эхо-сигналов составляют не менее 2—3 дБ, а погрешности определения отношения мощностей этих сигналов гораздо меньше и

Таблица 1

Минимальные значения интенсивности дождей  $I_{\min}$  (мм/ч),  
которые могут быть определены с помощью радара, установленного  
на ИСЗ TRMM

| $\sigma$ дБ | $\Delta R$ км |              |               |               |               |
|-------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
|             | 1             | 2            | 3             | 4             | 5             |
| 0,5         | 3,5/<br>1,3   | 2,25/<br>> 0 | 0,51/<br>> 0  | 0,25/<br>> 0  | 0,01/<br>> 0  |
| 1,0         | 12,3/<br>10,0 | 5,5/<br>4,60 | 4,33/<br>1,61 | 2,32/<br>0,88 | 1,66/<br>0,20 |
| 2,0         | 30,7/<br>26,3 | 13,7/<br>8,2 | 8,9/<br>7,2   | 6,5/<br>5,0   | 5,3/<br>3,5   |

Примечание.  $\sigma$  — погрешности измерений отношений эхо-сигналов в пределах расстояния  $\Delta R$ .

обычно не превышают 1 дБ. Если принять величину погрешностей измерения этих эхо-сигналов  $\sigma = 0,5$  дБ, то из анализа табл. 1 следует, что рассматриваемый способ определения интенсивностей дождей позволяет при высоте нулевой изотермы от 5 до 3 км обеспечивать определение практически всех дождей — от слабых ( $I = 0,25$  мм/ч) до очень сильных ( $I = 15...50$  мм/ч и более).

Для увеличения диапазона определения интенсивности дождей  $I$  дополнительно увеличим ослабление мощности эхо-сигналов в атмосферных газах ( $P_1$  и  $P_2$ ) в пять раз, т. е. на 7 дБ. В результате получим  $I_{\min}$ , используя формулу (2). Эти значения  $I_{\min}$  представлены в табл. 1 в знаменателе. Из таблицы видно, что при введении дополнительного ослабления возможно уверенное определение интенсивности зон дождей, вертикальные размеры которых превышают 2 км. Погрешность измерения отношений эхо-сигналов при этом составляет 0,5 дБ. При  $\sigma = 1$  дБ вертикальная протяженность дождей не должна быть меньше 4—5 км, чтобы диапазон определения  $I$  охватывал весь диапазон интенсивности дождей, наблюдаемых в природе.

Воспользуемся широко известной методикой, позволяющей расчетным путем оценить максимальную относительную погрешность определения интенсивности дождей ( $I_{\max}$ ) предложенным способом.

При решении данной задачи, основываясь на применяемых сейчас технологиях определения значений параметров, входящих в правую часть формулы (2), будем считать, что эти параметры определяются со следующими относительными погрешностями:  $\delta p = 39\%$  (погрешность определения мощности эхосигналов примем равной 0,5 дБ);  $\delta_{\Delta R} = 0,17\%$ ; погрешность определения высоты нижней границы дождевых облаков  $\delta_{\Delta R'} = 0,10\%$ ; погрешность определения коэффициента ослабления длины волны РЛС в газах атмосферы  $\delta_{\alpha_{\Gamma}} = 10\%$ ; погрешность определения удельного коэффициента ослабления за счет водности облаков  $\delta_{\alpha_o} = 10\%$ ; погрешность определения удельного коэффициента ослабления радиоволн в зонах дождей  $\delta_{\alpha_{\text{д}}} = 10\%$ ; погрешность определения водности облаков ниже изотермы 0 °С  $\delta_w = 20\%$ .

Имея в виду, что максимальная относительная погрешность определения интенсивности дождя выражается следующим известным соотношением:

$$\delta I_{\max} = \delta p + \delta_{\Delta R} + \delta_{\Delta R'} + \delta_{\alpha_{\Gamma}} + \delta_{\alpha_o} + \delta_{\alpha_{\text{д}}} + \delta_w, \quad (3)$$

получим, что

$$\delta I_{\max} = 39\% + 0,17\% + 10\% + 10\% + 10\% + 10\% + 20\% \approx 99,2\%. \quad (4)$$

Полученный результат можно считать приемлемым, поскольку он свидетельствует о том, что при нормальном законе распределения погрешностей определения интенсивности дождей значение  $\delta I$  будет существенно меньше.

### Заключение

В выполненных ранее исследованиях были показаны особенности и перспективность применения радиолокационного спутникового метода определения интенсивности дождей по ослаблению радиоволн в сравнении с методом, основанным на использовании радиолокационной отражаемости (Степаненко, Емельянова, Довгалюк, 2008). С учетом того, что первый спутниковый метеорологический радиолокатор, установленный на американско-японском ИСЗ TRMM, работает только на одной длине волны  $\lambda = 2,17$  см, были разработаны физические основы получения информации об интенсивности дождей по ослаблению именно на этой длине волны.

Показано, что наиболее благоприятными для определения интенсивности дождей являются тропические и субтропические зоны, где вертикальная протяженность дождей составляет 4—5 км. С нашей точки зрения для этих зон вполне надежно можно определять, по крайней мере, градации: слабый, умеренный, сильный и очень сильный дождь.

Авторы признательны Н. Е. Веремею за помощь при подготовке данной работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дадали Ю. А., Мальбахова Н. М., 1969. О характере рассеяния и ослабления микрорадиоволн в осадках. — Труды ВГИ, вып. 13.
- Степаненко В. Д., Гальперин С. М., 1983. Радиотехнические методы исследования гроз. — Л.: Гидрометеиздат. — 204 с.
- Степаненко В. Д., Довгалюк Ю. А., Качурин Л. Г., Емельянова В. Н., Синькевич А. А., 1999. Особенности радиолокационного обнаружения атмосферных осадков с ИСЗ. — Труды ГГО, вып. 547, с. 128—138.
- Степаненко В. Д., 1973. Радиолокация в метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат. — 343 с.
- Степаненко В. Д., Шалдаев С. Е., Мельник Ю. А., 2002. Возможности определения водности и интенсивности дождей по затуханию радиоволн с помощью многоволнового радиолокационного метода. — Труды XVI—XIX Всероссийских симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред», В. 2. — Санкт-Петербург, ВИКУ им. А. Ф. Можайского, с. 250—254.
- Степаненко В. Д., Емельянова В. Н., Довгалюк Ю. А., 2008. Возможности повышения качества информации о дождях, получаемой с помо-

щью спутниковой радиолокационной аппаратуры. — Труды ГГО, вып. 558, с. 143—151.

Boccippio D. J. et al., 2000. Regional differences in tropical lightning distributions. — *J. Appl. Meteor.*, V. 39, No. 12, Part 1, December, p. 2231—2248.

Kummerow C. et al., 2000. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. — *J. Appl. Meteor.*, V. 39, No. 12, Part 1, December, p. 1965—1982.

Heysmsfield G. M. et al., 2000. Precipitation radar reflectivity profiles as compared with high-resolution airborne and ground based radar measurements. — *J. Appl. Meteor.*, V. 39, No. 12, Part 1, December, p. 2080—2102.

Steven M. Bolen, Chandrusecar V., 2000. Quantitative cross validation of space-based and ground-based radar observations. — *J. Appl. Meteor.*, V. 39, No. 12, Part 1, December, p. 2071—2079.

УДК 551.510.534

**РАСЧЕТ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА  
ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ  
ПО РАДИАЦИИ ОТ ЗЕНИТА ЯСНОГО И ОБЛАЧНОГО НЕБА**

*А. А. Соломатникова*

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

Поступила в редакцию 23.04.2009, после доработки 01.09.2009

**Введение**

Озонная сеть Росгидромета, которая обеспечивает мониторинг состояния озонного слоя над территорией РФ, состоит из 28 станций, оснащенных фильтровыми озонόμεтрами М-124. Продолжительность рядов данных об общем содержании озона (ОСО) составляет более 35 лет. Использование на сети единой методики наблюдений и постоянный контроль шкалы измерений позволяют получать данные ОСО с высокой степенью надежности.

Разработанная в ГГО методика позволяет проводить наблюдения даже при малой высоте Солнца и при облачном небе, что существенно увеличивает объем получаемых данных, прежде всего для станций высоких широт. Однако производство озонόμεтров давно прекращено, приборы эксплуатируются на сети более 25 лет, они изношены физически и устарели морально. Для дальнейшего нормального функционирования озонόμεтрических станций необходимо их оснащение аппаратурой современного уровня.

Для переоснащения озонной сети Росгидромета в 2000—2001 гг. специалистами ГГО при инициативном участии специалистов-оптиков организаций Санкт-Петербурга был разработан ультрафиолетовый озонный спектрометр УФОС, предназначенный для комплексных измерений спектрального состава УФ радиации и ОСО.

Автоматизация измерений значительно усложняется из-за необходимости учета влияния облачности, которое может вносить

погрешность до 20 % в результаты расчетов ОСО. Вместе с тем опыт измерений на озонной сети Росгидромета, большинство станций которой расположены в умеренных и полярных широтах, показал, что наблюдения по солнцу или ясному зениту составляют только 30 % всего объема наблюдений. Естественно, что при переходе к автоматизированным измерениям ОСО необходимо обеспечить объем данных, поступающих от сети, не меньший, чем тот, который обеспечивали измерения, проводимые с помощью М-124. При ручных наблюдениях для учета влияния облачности используется визуальная оценка состояния неба оператором во время проведения наблюдений. При автоматизированных измерениях привлечение визуальных оценок невозможно — необходим инструментальный способ введения поправок на облачность.

Настоящая работа представляет собой описание основных этапов разработки метода расчета ОСО при автоматизированной регистрации спектрального состава УФ радиации, приходящей от зенита ясного или облачного неба.

## 1. Методы и приборы для определения ОСО

На мировой озонной сети для регулярных измерений используются три вида приборов: озонный спектрофотометр Добсона (СФД) (Dobson, 1957; Комхур, 1980), озонный спектрофотометр Брюера (СФБ) (Brewer, 1973) и фильтровый озонометр М-124 (Гущин, Соколенко, 1987). При значительных различиях способов выделения рабочих спектральных интервалов во всех приборах используется дифференциальный метод измерений. ОСО определяется по отношению уровней УФ радиации на двух длинах волн (или в двух спектральных интервалах), которые характеризуются различными коэффициентами поглощения озона. Для определения ОСО применяется как прямая солнечная радиация, так и радиация, приходящая от зенита неба. (Под радиацией, приходящей от зенита неба, подразумевается энергетическая освещенность, создаваемая рассеянным в атмосфере солнечным излучением, которое поступает от зенита неба в секторе  $15^\circ$ .)

Основным, самым надежным и теоретически обоснованным способом измерений ОСО, является определение ОСО при изме-



рениях по прямой солнечной радиации. В этом случае используют уравнение для расчета энергетической освещенности солнечной ультрафиолетовой радиацией на длине волны  $\lambda$  (закон Бугера—Ламберта), которое описывает ослабление радиации при прохождении через атмосферу:

$$S_{\lambda} = S_{0\lambda} \cdot 10^{-\alpha_{\lambda}\mu X - \beta_{\lambda}m - \delta_{\lambda}m'}, \quad (1)$$

где  $S_{0\lambda}$  — энергетическая освещенность на верхней границе атмосферы ( $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{нм})$ );  $\alpha_{\lambda}$  — показатель поглощения озона ( $\text{см}^{-1}$ );  $\beta_{\lambda}$  — показатель рэлеевского ослабления атмосферы;  $\delta_{\lambda}$  — показатель аэрозольного ослабления;  $\mu$  и  $m$  — озонная и воздушная оптические массы соответственно;  $m'$  — оптическая масса аэрозольной составляющей;  $X$  — общее содержание озона, атм-см (Гущин, Виноградова, 1983).

ОСО рассчитывается по отношению интенсивности потоков УФ радиации на двух длинах волн. Для узкополосных приборов справедливо выражение

$$X = \frac{(\lg I_{0\lambda_1} - \lg I_{0\lambda_2}) - (\lg I_{\lambda_1} - \lg I_{\lambda_2}) - \Delta\beta_{\lambda_{12}} m - \Delta\delta_{\lambda_{12}} m'}{\Delta\alpha_{\lambda_{12}} \mu}. \quad (2)$$

При зенитных измерениях регистрируется радиация от зенита неба в секторе  $15^\circ$ . Для определения ОСО с помощью спектрофотометра Добсона по радиации, приходящей от зенита ясного неба, используют специальные номограммы или семейство полиномов, описывающие связь отношения сигналов по зениту на паре длин волн с высотой солнца и ОСО. Эти номограммы получены эмпирическим путем по результатам многолетних измерений (Компуг, 1980). Подобная методика используется и при измерениях с помощью спектрофотометра Брюера (Brewer, 1973).

Принципиальное отличие метода зенитных измерений, производимых с помощью озонметра М-124, заключается в использовании для расчета ОСО закона Бугера—Ламберта, а не эмпирически определенных семейств полиномов, как это делается при использовании спектрофотометров Добсона и Брюера (Ромашкина,

1984; Шаламянский и др., 2002). Для расчета ОСО по данным облачных наблюдений был использован следующий, подтвержденный многолетними наблюдениями на всех станциях факт: при фиксированных значениях оптической массы атмосферы и ОСО отношение отсчетов при появлении облачности зависит только от оптической плотности облачности в зените неба. Более того, эта зависимость сохраняется при всех высотах солнца и ОСО. Эмпирическим путем были определены поправочные коэффициенты, которые следует вводить при разных типах облачности.

## **2. Расчет ОСО при автоматизированных наблюдениях по зениту ясного и облачного неба**

Ультрафиолетовый озонный спектрометр (УФОС) предназначен для автоматизированных комплексных измерений спектрального состава УФ радиации и ОСО. Спектральный блок прибора представляет собой полихроматор на дифракционной решетке с ПЗС линейкой, выделяющий спектр радиации в диапазоне от 280 до 420 нм с разрешением около 1 нм. В зависимости от уровня естественной освещенности время регистрации УФ спектра (экспозиция) составляет от 0,05 до 2 с.

Для расчета ОСО используются регистрируемые прибором спектры УФ радиации, приходящей от зенита неба. Поскольку наблюдения по УФОС выполняются в автоматическом режиме, методика обработки результатов должна учитывать изменения спектрального состава приходящей радиации в зависимости от наличия или отсутствия облачности. При этом должны быть обеспечены необходимые точность и оперативность получения информации. Для оперативного учета влияния облачности на измерения ОСО требуется дополнительная информация, причем эта информация должна отражать состояние быстро меняющейся облачности в момент измерений. УФОС предоставляет возможность получения такой информации.

В настоящее время экспериментальные образцы УФОС проходят натурные испытания на станциях в Воейково, Мурманске и Цимлянске. Набранный во время проведения измерений массив данных о спектральном составе УФ радиации был сопоставлен с результа-

тами стандартных измерений ОСО, проводимых на тех же станциях с помощью фильтровых озонометров М-124. Дополнительно периодически проводилась визуальная регистрация состояния неба, синхронизированная с измерениями УФОС. Полученные данные были применены для разработки метода расчета ОСО по свету от зенита ясного и облачного неба. В основном был использован наиболее устойчивый ряд измерений на ст. Мурманск.

### 2.1. Расчет ОСО при наблюдениях по зениту ясного неба

В результате анализа большого массива спектров УФ радиации для каждого образца УФОС было определено, что отношение уровней прямой солнечной радиации ( $I_s$ ) и радиации, приходящей из зенита ясного неба ( $I_z$ ), зависит от длины волны, оптической массы и содержания озона.

Для расчета ОСО используются два участка спектра УФР. При калибровке были выбраны пары длин волн, обеспечивающие наилучшую чувствительность к ОСО (310 и 329 нм, 311 и 330 нм). При калибровке прибора в момент измерения величина ОСО известна, и по закону Бугера—Ламберта может быть рассчитан спектр прямой солнечной радиации. Из соотношения между спектром рассчитанной солнечной радиации и спектром измеренной радиации от зенита ясного неба для указанных выше пар длин волн были найдены зенитные коэффициенты  $K_z$ :

$$K_z = F(L_{sz}, \mu), \quad (3)$$

$$L_{sz} = \lg(I_{s_{\lambda_1}} / I_{s_{\lambda_2}}) - \lg(I_{z_{\lambda_1}} / I_{z_{\lambda_2}}), \quad (4)$$

где  $I_{s_{\lambda_1}}$  и  $I_{s_{\lambda_2}}$  — энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , рассчитанная по формуле (1), а  $I_{z_{\lambda_1}}$  и  $I_{z_{\lambda_2}}$  — измеренная для тех же длин волн энергетическая освещенность радиацией от зенита ясного неба (расчет производится для высоты солнца более  $8^\circ$ ).

$K_z$  определяется во время калибровки в условиях повышенной прозрачности атмосферы. Из-за отсутствия общей калибровки всех экспериментальных образцов УФОС в абсолютной шкале УФР и некоторых различий в оптических схемах инструментов пока не удалось определить универсальные численные значения, описывающие соотношение между прямой солнечной УФ радиацией и радиацией, приходящей из зенита неба. Поэтому для каждого образца УФОС применяются индивидуальные зенитные коэффициенты.

Коэффициент определяется при калибровке по формуле (3) при определенном значении ОСО. При измерениях к  $K_z$  вводится «поправка на озон»  $C_{\mu X}$ :

$$C_{\mu X} = F[(K_{zX} - K_{zX0}), (X - X_{K_z}), \mu], \quad (5)$$

где  $X$  — значение ОСО в момент измерений, а  $K_{zX}$  — ОСО при калибровке.

Тогда формула (2) для расчета ОСО по спектру УФР от зенита ясного неба с учетом (3) и (4), приобретает вид

$$X = \frac{\lg\left(\frac{I_{01}}{I_{02}}\right) - \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right) - \Delta\beta_{12}m - K_z + C_{\mu X}(X - X_{K_z})}{\Delta\alpha_{12}\mu}. \quad (6)$$

## 2.2. Расчет ОСО по радиации от зенита облачного неба

Если на мировой озонной сети измерения ОСО по зениту ясного неба давно и успешно освоены, то в случае измерений при наличии облачности, когда за считанные минуты многократно меняются ее оптическая плотность и спектральный состав, серьезные трудности возникают как при производстве наблюдений, так и при интерпретации их результатов. При ручном способе наблюдений (спектрофотометр Добсона, озонметр М-124) в случае меняющейся облачности трудно получить устойчивый сигнал. Более устойчивы сигналы при автоматизированных измерениях (спектрофотометр Брюера), но до настоящего времени отсутствует надежный способ расчета ОСО при наблюдениях по облачному зениту.

На рис. 1 приведены примеры спектрального состава УФР, приходящей от зенита ясного и облачного (Cs, Sc) неба при одинаковых высоте солнца ( $30^\circ$ ) и содержании озона. Рассеяние и поглощение УФР на облачных частицах изменяют спектральный состав приходящей радиации, поэтому соотношения и коэффициенты, определенные при калибровке в условиях ясной погоды, не обеспечивают корректного расчета ОСО по формуле (6). При наличии облачности и ее уплотнении изменяются интенсивность УФР и крутизна ее спектрального хода (при этом структура спектра практически не изменяется).

При расчете ОСО при облачных измерениях используется присущее спектру УФР свойство одновременно изменять спектральный ход как в области поглощения озона (до 330 нм), так и вне ее. Если в коротковолновой «озонной» области практически невозможно разделить вклад озона и облачности в изменения

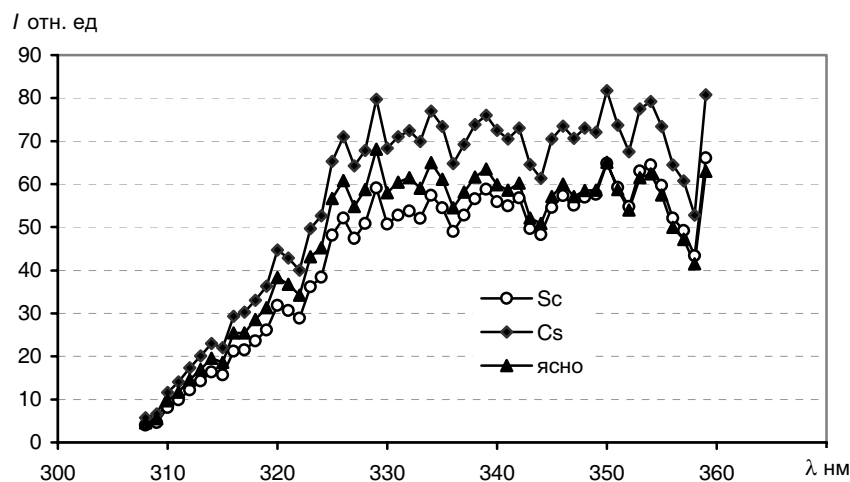


Рис. 1. Спектральный состав УФР, приходящей из зенита неба при высоте солнца  $30^\circ$  при разных видах облачности и ясном небе по данным измерений УФР, выполненных с использованием УФФС. Мурманск, апрель 2007 г.

спектра, то в длинноволновой (330—400 нм), где влияние озона фактически отсутствует, он легко определяется.

Поскольку полихроматор УФОС одновременно регистрирует спектр во всем диапазоне УФР, это существенно облегчает задачу учета изменений в спектре при быстро меняющейся облачности.

Для оценки влияния облачности при измерениях с помощью УФОС можно использовать параметр, характеризующий крутизну спектрального хода УФР вне полосы поглощения озона, но в диапазоне, непосредственно примыкающем к полосе. В настоящей работе таким параметром является разность логарифмов сигналов для пары длин волн 330 и 350 нм.

При анализе данных было определено, что параметр  $\lg(I_{330}/I_{350})$  в безоблачную погоду и при неизменной высоте солнца является величиной постоянной. Для условий калибровки зависимость параметра  $\lg(I_{330}/I_{350})$  от массы атмосферы может быть описана полиномом 3-й степени (рис 2). При облачности величина отклонения зависит от оптической толщины воздушной массы и оптической плотности облака. На рис. 2 параметр  $\lg(I_{330}/I_{350})$  представлен для условий ясного и облачного неба. Данные получены для дней с устойчивой облачностью.

Для количественной оценки изменения крутизны спектра УФ радиации во внеозонной области при появлении облачности может быть использована мера отклонения ( $\Delta$ ) текущего параметра  $\lg(I_{330}/I_{350})$ , определенного по результатам измерений ( $\lg(I_{330}/I_{350})_{\text{real}}$ ) от «идеального» параметра ( $\lg(I_{330}/I_{350})_{\text{bl}}$ ), определенного во время калибровки по зениту ясного неба:

$$\Delta = \lg(I_{330}/I_{350})_{\text{bl}} - \lg(I_{330}/I_{350})_{\text{real}}. \quad (7)$$

Пример дневного хода  $\Delta$  для двух конкретных дней с облачностью разных форм представлен на рис. 3.

Изменения в спектре УФР в области поглощения озона за счет облачности могут быть количественно оценены, если отследить различие зенитного коэффициента при облачности ( $K_{z_{\text{обл}}}$ ) и при ясном небе ( $K_{z_{\text{я}}}$ ). Для этого, зная значение ОСО ( $X$ ) в момент из-

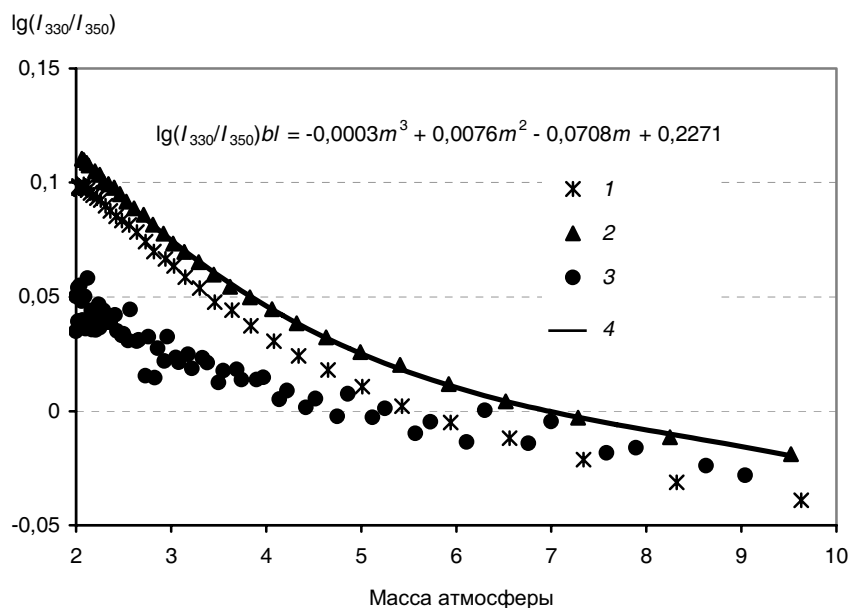


Рис. 2. Суточный ход логарифмического отношения сигналов для пары длин волн (330 и 350 нм) при ясном и облачном зените неба.  
 1 — Сi, 12 апреля 2007 г.; 2 — ясное небо, 13 апреля 2007 г.; 3 — Sc, 15 апреля 2007 г.; 4 — полиномиальный, ясное небо, 13 апреля 2007 г.

мерений, можно по формуле (5) рассчитать значение  $K_{z_{обл}}$  и найти его отличие ( $C_{zc}$ ) от  $K_{z_{я}}$  :

$$C_{zc} = K_{z_{обл}} - K_{z_{я}} .$$

Облачный коэффициент  $C_{zc}$ , так же как  $C_{\mu X}$ , является поправкой к  $K_z$ . При получении значений  $C_{zc}$  были использованы результаты совместных измерений со стационарными озонometрами М-124 в облачные дни. Всего было отобрано около 30 дней с различными формами облачности.

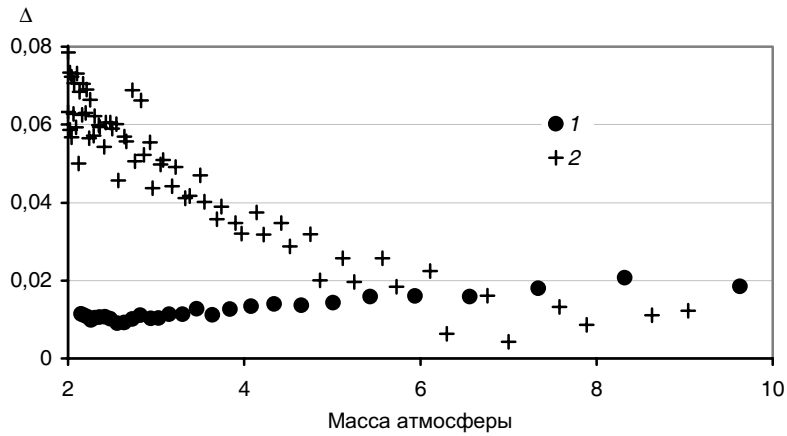


Рис. 3. Дневной ход параметра  $\Delta$  — изменение крутизны спектра УФР во «внеозонной» области при наличии облачности. Мурманск.  
 1 — Сi, 12 апреля 2007 г.; 2 — Sc, 15 апреля 2007 г.

Сопоставление параметров  $\Delta$  и  $C_{zc}$  выявило наличие устойчивой линейной связи (рис. 4), описываемой уравнением вида  $C_{zc} = a\Delta + b$ . Тем самым была обеспечена экстраполяция оценки влияния облачности на спектр во внеозонной области на участок спектра, в котором происходит расчет ОСО.

Соответственно для расчета ОСО при измерениях спектрального состава УФР от зенита при ясном и облачном небе с помощью УФОС применяются следующие выражения:

$$X = \frac{\lg\left(\frac{I_{01}}{I_{02}}\right) - \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right) - \Delta\beta_{12}m - K_z + C_{\mu x}(X - X_{kz}) - C_{zc}m}{\Delta\alpha_{12}\mu}, \quad (8)$$

$$C_{zc} = a\Delta + b, \quad (9)$$

$$\Delta = \lg\left(\frac{I_{330}}{I_{350}}\right)bl - \lg\left(\frac{I_{330}}{I_{350}}\right). \quad (10)$$



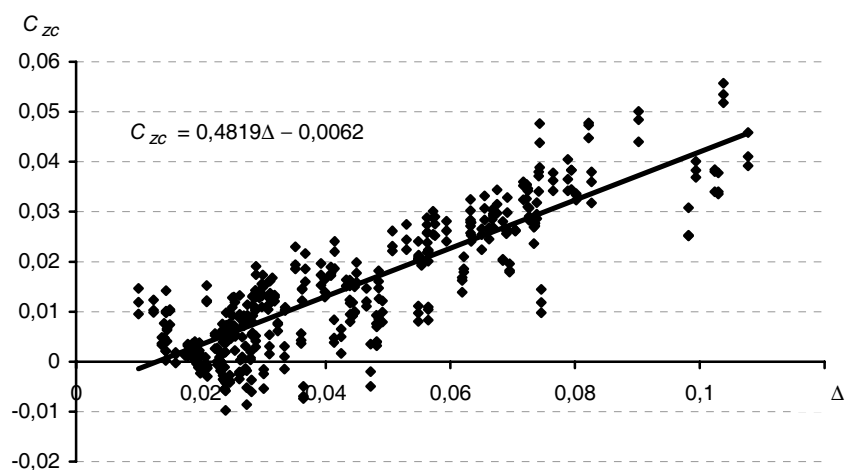


Рис. 4. Связь параметров  $\Delta$  и  $C_{zc}$  по данным измерений УФР, выполненных с использованием УФОС. Мурманск.

Пример результатов расчета ОСО для дня с переменной облачностью без введения поправки на облачность и после введения коррекции представлены на рис. 5. Очевидно, что введение облачного коэффициента позволяет обеспечить необходимую точность автоматизированных измерений ОСО по свету от зенита не только ясного, но и облачного неба.

Разработанный метод расчета ОСО при автоматизированных спектральных измерениях УФР прошел апробацию и показал хорошие результаты во время измерений с помощью экспериментальных образцов УФОС в Воейково, Мурманске и Цимлянске.

#### Заключение

При разработке метода расчета ОСО по результатам спектральных измерений, выполняемых с использованием автоматизированного УФ озонного спектрометра УФОС, была поставлена

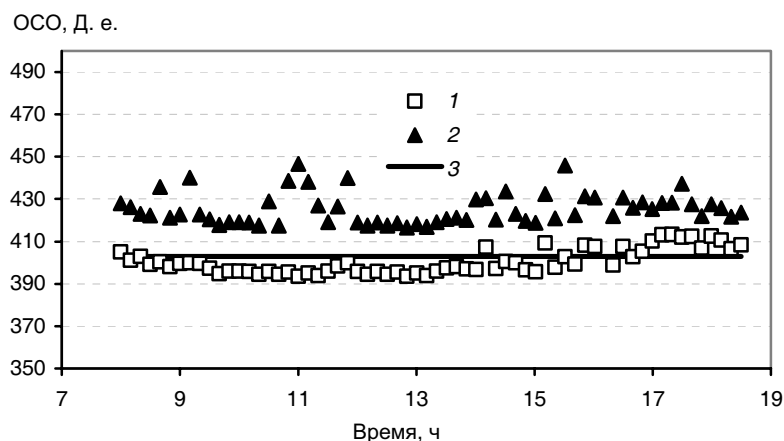


Рис. 5. Результаты расчета ОСО при измерениях спектрального состава УФР с помощью УФОС. Воейково, 18 марта 2007 г.

1 — до введения коррекции на облачность, 2 — после введения коррекции, 3 — среднее за день по станционному озонметру М-124.

задача обеспечить точность, автономность и оперативность регулярных сетевых измерений по свету от зенита при ясном и облачном небе.

Способность ультрафиолетового озонного спектрометра одновременно регистрировать спектральный состав УФР как в области поглощения озона, так и вне ее позволяет вводить поправку на облачность автоматически, используя для этого сами результаты измерений. Влияние облачности оценивается во внеозонной области УФ спектра, затем эта оценка экстраполируется на озонную область. Применение данной методики обеспечивает необходимую точность и автономность работы УФОС по свету от зенита как ясного, так и облачного неба. Введение инструментальных поправок на облачность позволяет избежать погрешностей, которые могут составлять от 5 до 20 % в зависимости от вида и оптических свойств облачности.

Работы по развитию и усовершенствованию методики продолжают. Однако уже на данном этапе можно с уверенностью

заявить, что разработанные в ГГО автоматизированная аппаратура (УФОС) и методика измерений соответствуют требованиям ВМО и способны обеспечить непрерывные всепогодные измерения ОСО и спектрального состава УФР, что позволяет многократно увеличить объем и оперативность информации, получаемой от сети Росгидромета.

Автор благодарна А. М. Шаламянскому за ценные замечания, полученные при подготовке настоящей работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гущин Г. П., Виноградова Н. Н., 1983. Суммарный озон в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат. — 241 с.

Гущин Г. П., Соколенко С. А., 1987. Новый малогабаритный озонометр М-124, предназначенный для измерения суммарного озона. — В сб.: Атмосферный озон. Труды VI Всесоюз. симпозиума, Ленинград, 15—17 мая 1985 г. — Л., с. 49—56.

Ромашкина К. И., 1984. Усовершенствованная методика градуировки озонометра М-83 по свету от зенита неба. — Труды ГГО, вып. 472, с. 74—82.

Шаламянский А. М., 1993. Озонометрическая сеть СНГ. — Метеорология и гидрология, № 9.

Шаламянский А. М., Ромашкина К. И., Игнатенко В. М., 2002. Усовершенствование методики измерений ОСО по свету от зенита неба. — Труды ГГО, вып. 552, с. 102—109.

Шаламянский А. М., Ромашкина К. И., Привалов В. И., 2004. Сравнительный анализ методов и приборов для наземных измерений общего содержания озона. — В сб.: Прикладная метеорология. — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 5 (553), с. 187—206.

Brewer A. W., 1973. A replacement for the Dobson spectrophotometer. *Pure and App. Geoph.*, V. 106, p. 108.

Dobson G.M.B., 1957. Observers' handbook for the ozone spectrophotometer. — *Ann. IGY*, part 1, p. 46—89.

Evans W.F.J. et al., 1987. Stratospheric ozone science in Canada: A. N. agenda for research and monitoring. — *Atm. Environ. Rep.*, ARD-87-3. — 127 p.

Feister U., Gericke K., 1998. Cloud flagging of UV spektral irradiance measurements. — *Atmos. Res*, V. 49, No. 2, p. 115—138.

Komhyr W. D., 1980. Operator handbook ozone observations with a Dobson spectrophotometer. — WMO. — 128 p.

WMO-UMAP Workshop on broad band UV-radiometers (Garmish-Partenkirchen, Germany, 22—23 April 1996). — WMO Rep., No 120. — 45 p.

УДК 551.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

*П. С. Зименков*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
e-mail: pavel\_zimenkov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2009, после доработки 23.09.2009

### Введение

В настоящее время существует множество иностранных фирм, которые занимаются производством метеостанций, измеряющих параметры, характеризующие состояние дорожной поверхности. К таким параметрам относятся: температура поверхности, толщина слоя отложений (вода, лед, снег), концентрация примесей в этом слое, температура образования льда.

В России подобные станции не производят, а используют иностранные, в основном производства фирм Vaisala и LUFFT. Перечисленные выше параметры измеряются датчиками, установленными в дорожное полотно. К недостаткам этих датчиков относятся высокая стоимость (DRS511 и IRS31) и неремонтопригодность (DRS511). В основу датчиков, не изменяющих температуру поверхности (например, DRS511), положен пассивный метод измерения, а в основу датчиков, изменяющих температуру поверхности (например, IRS31), — активный метод. В ГУ «ГГО» разработан датчик пассивного типа (ДПТ), являющийся аналогом DRS511 по методу измерения отложений.

Отправной точкой создания ДПТ послужил материал, изложенный в описании датчика наличия гололеда (Кобус и др., 1969), разработанного в ГУ «ГГО», а также материалы патентного поиска (Bostrom, 2002; Weinstein, 2001). В результате развития описанных идей получен интеллектуальный датчик, предназначенный для установки на дорожном покрытии, взлетно-

посадочной полосе аэродрома, метеорологической площадке и позволяющий определять:

состояние подстилающей поверхности в градациях «сухо—влажно»,

гололед в градациях «наличие—отсутствие»,

а также измерять следующие величины:

температуру поверхности в диапазоне  $-50...50$  °С,

толщину слоя воды до 8 мм,

толщину льда до 8 мм.

### **Концепция**

В основу функционирования ДПТ положены следующие общие соображения.

1. Каждое вещество имеет определенное удельное сопротивление, и, значит, измерив удельное сопротивление, можно определить вещество или группу веществ с таким удельным сопротивлением.

2. Вода в жидком состоянии, с примесями или без, имеет более низкое удельное сопротивление, чем в твердом.

3. Во избежание окислительно-восстановительных реакций измерение сопротивления необходимо производить на переменном токе, т. е. удельное сопротивление следует изменить на удельный импеданс.

4. Чувствительный элемент, с помощью которого происходит измерение импеданса, обозначим как сенсор импеданса. Он контактирует с исследуемым веществом и состоит из пары электродов, разделенных диэлектриком; устойчив к воздействию окружающей среды.

5. Измерительная схема должна перекрывать диапазон принимаемых значений импеданса и обеспечивать высокую точность измерений во всем температурном диапазоне.

Рассмотрим более подробно реализацию и возможности ДПТ.

### **Датчик пассивного типа**

В состав датчика пассивного типа (рис. 1) входят:

широкий сенсор импеданса (1),

узкий сенсор импеданса (2),

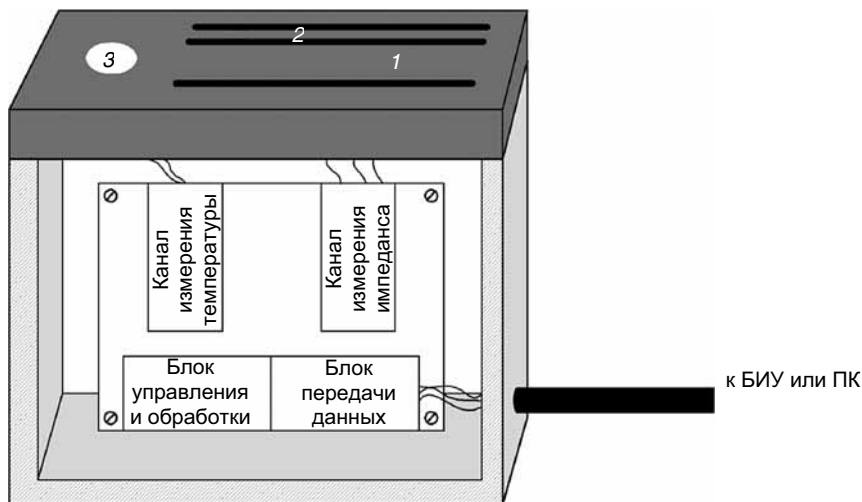


Рис. 1. Устройство датчика пассивного типа.

канал измерения импеданса,  
 платиновый термометр сопротивления (ПТС) (3),  
 канал измерения температуры,  
 блок передачи данных,  
 блок управления и обработки данных.

Наиболее сложный алгоритм используется для измерения слоя воды/льда. Остановимся на нем более подробно.

На импеданс сенсора влияют удельное сопротивление и толщина слоя вещества на его поверхности. Эту зависимость можно представить в следующем виде:

$$I = \rho L / S = \rho h f(h), \quad (1)$$

где  $I$  — измеренный импеданс;  $\rho$  — удельный импеданс;  $L$  — условная токопроводящая длина, зависящая от высоты слоя на поверхности ( $h$ ) и геометрии (площадь поверхности пластин и расстояние между ними) сенсора;  $S$  — условная токопроводящая площадь, зависящая от высоты слоя на поверхности и геометрии сенсора;  $f(h)$  —

функция зависимости импеданса сенсора от высоты слоя при постоянном удельном импедансе, определенная калибровкой.

Очевидно, что измерение импеданса сенсора недостаточно для вычисления этих параметров. Однако если добавить еще один сенсор с другим расстоянием между электродами, то получим систему уравнений с двумя неизвестными:

$$I_1 = \rho L_1 / S_1 = \rho h f_1(h), \quad (2)$$

$$I_2 = \rho L_2 / S_2 = \rho h f_2(h). \quad (3)$$

Решив эту систему уравнений, получим искомые удельный импеданс и толщину.

Точность определения этих параметров зависит от точности измерения импеданса сенсоров, т. е. точности измерительного канала. Точность измерительного канала во всем диапазоне обеспечена делением на поддиапазоны, использованием прецизионного преобразователя импеданс—код, использованием прецизионных опорных и эталонных резисторов, автоматической калибровкой канала при изменении температуры более чем на 1 °С. Применение перечисленных мер обеспечивает значения точности измерений по всему диапазону сопротивлений, приведенные в табл. 1, для постоянной температуры 20 °С и высокую температурную стабильность измерительной схемы (табл. 2).

Из табл. 1 видно, что наибольшие относительные погрешности наблюдаются в начале 1-го поддиапазона измерения — это соответствует солевому раствору; в 5-м поддиапазоне измерения это соответствует льду, в 6-м поддиапазоне — сухой поверхности (здесь количественные параметры не измеряются). Все соответствия указаны для применяемых сенсоров. Таким образом, измерительный канал импеданса вносит наибольшую погрешность при измерении слоя солевого раствора и льда. Следует также отметить, что в реальных условиях толщина слоя и удельный импеданс на сенсорах могут различаться, и это приводит к увеличению погрешности.

Рассчитав удельный импеданс, требуется определить вещество. Поскольку удельный импеданс и вещество не всегда имеют однозначную связь, необходимо вводить дополнительную информацию — температуру поверхности и температуру замерзания.

Таблица 1

**Точность измерений параметров при постоянной температуре  
T = 20 °C**

| Номер поддиапазона | Диапазон измерения, Ом               | Сопротивление, Ом       |              | Относительная погрешность, % |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------|------------------------------|
|                    |                                      | тестовое                | измеренное * |                              |
| 1                  | 0—10 <sup>3</sup>                    | 54,7                    | 54,4         | 0,55                         |
|                    |                                      | 402,1                   | 401,5        | 0,15                         |
|                    |                                      | 10 <sup>3**</sup>       | 1000,7       | 0,07                         |
| 2                  | 10 <sup>3</sup> —10 <sup>4</sup>     | 5050 <sup>***</sup>     | 5048,8       | 0,024                        |
| 3                  | 10 <sup>4</sup> —10 <sup>5</sup>     | 10 <sup>5**</sup>       | 99 631,5     | 0,37                         |
| 4                  | 10 <sup>5</sup> —10 <sup>6</sup>     | 10 <sup>6****</sup>     | 98 9245      | 1,1                          |
| 5                  | 10 <sup>6</sup> —10 <sup>7</sup>     | 10 <sup>7****</sup>     | 9 683 983    | 3,2                          |
| 6                  | 10 <sup>7</sup> —3 · 10 <sup>7</sup> | 2 · 10 <sup>7****</sup> | 19 135 000   | 4,3                          |
|                    |                                      | 3 · 10 <sup>7****</sup> | 27 691 000   | 7,7                          |

\* Выбраны значения с максимальным отклонением от номинального значения. При усреднении погрешность существенно уменьшится.

\*\* Резистор с допуском 0,1 % .

\*\*\* Резистор с допуском 0,05 % .

\*\*\*\* Резистор с допуском 0,25 % .

Таблица 2

**Результаты измерения эталонного сопротивления в диапазоне температур от -40 до 40 °C при тестовом сопротивлении 402,1 Ом**

|                         |       |       |       |       |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура, °C.....    | 40    | 20    | 0     | -20   | -40   |
| Сопротивление, Ом ..... | 401,6 | 401,5 | 401,5 | 401,4 | 401,3 |

Для получения высокой точности (не хуже ±0,1 °C в заявленном диапазоне) при относительно невысокой стоимости проводится калибровка ПТС совместно с каналом температуры по эталонному термометру с точностью не хуже ±0,003 °C. Канал температуры построен на базе прецизионных 16-битного АЦП и опорного резистора и имеет разрешающую способность 0,02 °C. Результаты проверки термометра в лабораторных условиях приведены в табл. 3.



Таблица 3

## Результаты проверки термометра в лабораторных условиях

| Температура, °С |                     | Абсолютная погрешность, °С |
|-----------------|---------------------|----------------------------|
| ПТС             | Эталонный термометр |                            |
| 14,65           | 14,65               | 0,00                       |
| -0,07           | -0,06               | -0,01                      |
| -6,25           | -6,24               | -0,01                      |
| -15,70          | -15,70              | 0,00                       |

Для измерения толщины слоя были проведены следующие эксперименты. На откалиброванный датчик с установленным по периметру герметичным бортиком заливался слой воды известной толщины. Чтобы предотвратить испарение (неизвестное изменение толщины), открытая часть заклеивалась липкой лентой. При понижении окружающей температуры происходит образование льда. На рис. 2 и 3 представлена погрешность измерения слоя, вызванная погрешностью измерительной схемы (не происходит изменения фазы вещества). Погрешность, вызванную несовершенством метода (переходный процесс, однородность на сенсорах сильно нарушена) и составляющую до 200 % (на рисунках не приведена), необходимо устранять программным способом.

Из рисунков видно, что погрешность измерения толщины слоя воды составляет не более  $\pm 10\%$ , а слоя льда — не более  $\pm 20\%$ . При введении десятиминутного осреднения (жирная кривая) погрешность измерения толщины слоя льда не превышает  $\pm 5\%$ .

### Заключение

При испытании датчик пассивного типа показал высокую точность измерения температуры и толщины слоя воды и приемлемую точность измерения слоя льда, которая повышается программным способом. Таким образом, датчик пассивного типа не уступает зарубежным аналогам по точности измерения параметров и имеет относительно низкую стоимость и ремонтпригодную конструкцию.

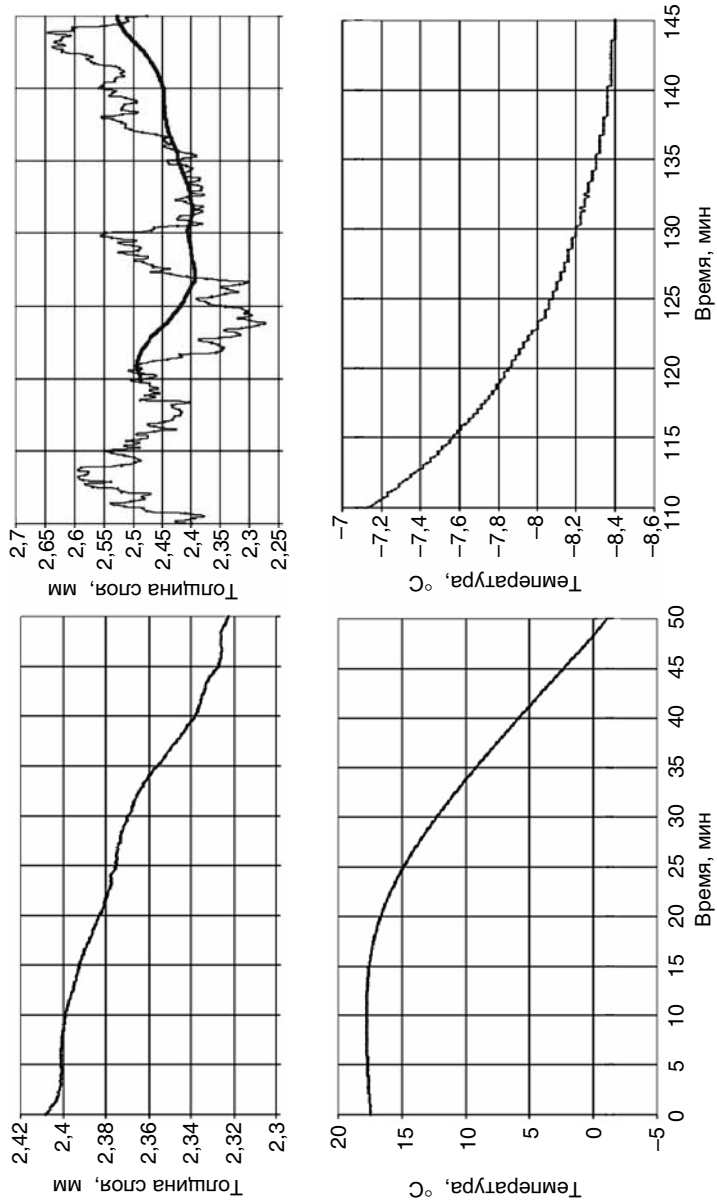


Рис. 2. Результаты измерения толщины слоя воды 2,2 мм (слева) и слоя льда 2,4 мм (справа).

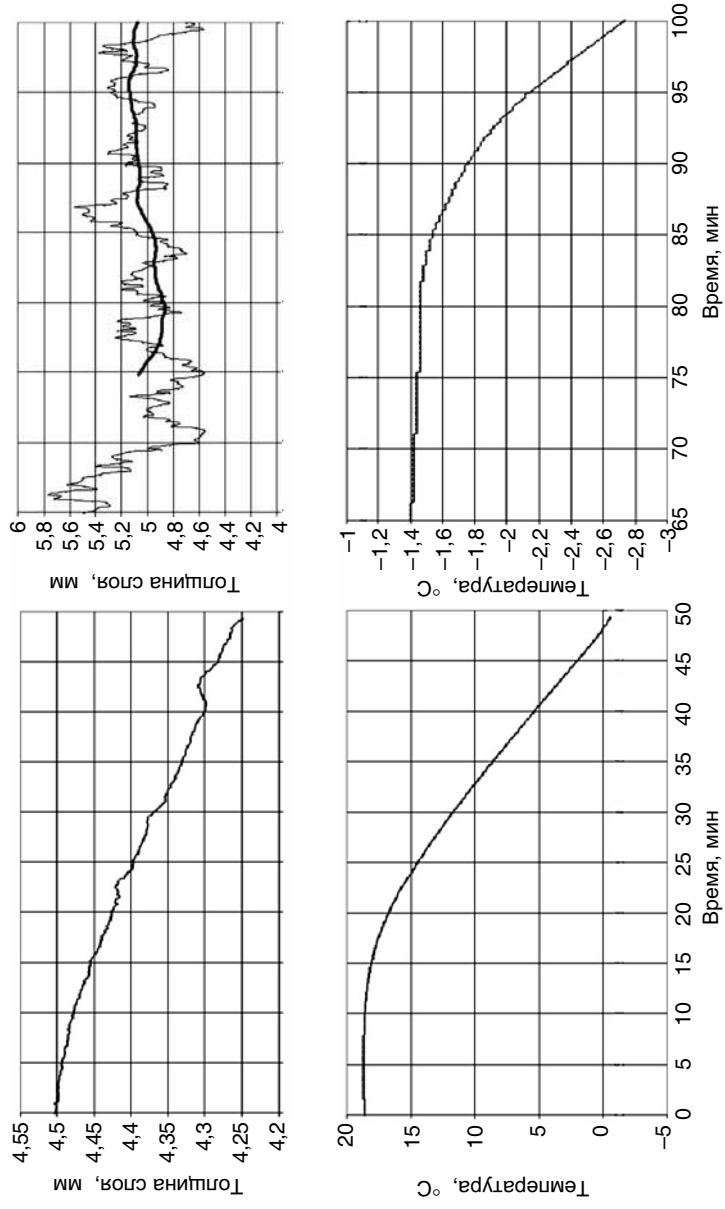


Рис. 3. Результаты измерения толщины слоя воды 4,4 мм (слева) и слоя льда 4,9 мм (справа).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кобус Г. Л., Солдатов Б. И., Осадчий А. И., 1969. А. с. 233256. Датчик наличия гололеда. — БИ, № 2.

Weinstein L. M., 2001. Пат. US 6239601 B1. Thickness measurement device for ice or ice mixed with water or other liquid. May 29.

Operating Manual IRS31-UMB.

ROSA, анализатор поверхности дорог и ВПП. Руководство пользователя, 1998.

Bostrom R., 2002. Пат. US 6456200 B1. Device for indicating ice formation, Sep. 24.

## 50 лет лаборатории химического анализа атмосферных осадков

*П. Ф. Свистов, А. И. Полищук, Н. А. Першина,  
М. Т. Павлова*

В 2008 г. исполнилось 50 лет направлению *химия атмосферы*, связанному с изучением физико-химических свойств различных примесей, находящихся в атмосфере в виде аэрозолей и газов, химических процессов, происходящих в атмосфере, и химического состава атмосферных осадков (ХСО).

Интерес к химии осадков возник в связи с развитием физики облаков и выяснением химической природы ядер конденсации. Систематическое изучение ХСО и содержания атмосферных ядер конденсации на территории бывшего СССР было предпринято по инициативе Е. С. Селезневой в период Международного геофизического года и следующего за ним Международного года спокойного Солнца (1957—1959 гг.) (Селезнева, 1957).

Под научным и методическим руководством Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова профессором Е. С. Селезневой впервые на территории страны была создана сеть станций по специализированному отбору проб осадков на химический анализ и на определение их кислотности (Селезнева, Гуцин, 1961).

К 1990 г. сеть таких станций на территории СССР была самой большой в мире — число станций достигало трехсот. В последующие годы в России произошло заметное сокращение сети. Однако в настоящее время этим работам стало уделяться больше внимания, и к концу 2007 г. национальная сеть включала уже 197 станций. На этих станциях проводятся следующие наблюдения: в 60 пунктах — за химическим составом и кислотностью, в 67 — только за кислотностью и в 70 — только за химическим составом (Методическое письмо, 2008).

Динамика развития сети мониторинга химического состава и кислотности атмосферных осадков показана на рис. 1.

Наблюдения за химическим составом атмосферных осадков проводятся в два этапа: отбор проб и химический анализ в лаборатории.

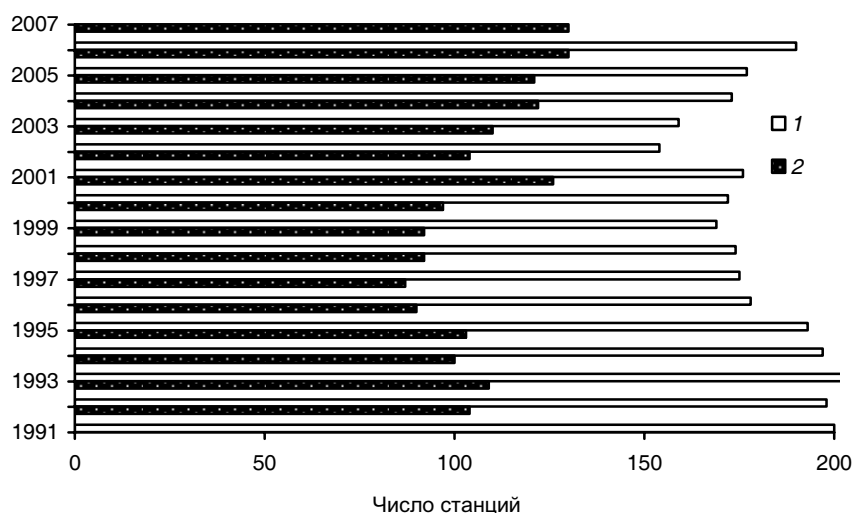


Рис. 1. Развитие сети наблюдений за кислотностью и химическим составом атмосферных осадков в 1991—2007 гг.

1 — наблюдения за химическим составом и кислотностью, 2 — наблюдения за химическим составом.

Первый этап — сбор проб осадков (твердых и жидких) в специальное пробоотборное устройство.

Второй этап начинается, когда проба доставлена в лабораторию. Здесь она отфильтровывается и поступает на химический анализ. Измеряется концентрация главных ионов — макрокомпонентов (сульфаты, хлориды, нитраты, гидрокарбонаты или кислотность, ионы аммония, натрия, калия, кальция, магния), определяется величина рН, удельная электропроводность, рассчитывается общая минерализация. При необходимости проводится измерение содержания микроэлементов (до 30 компонентов). Эта программа полностью соответствует рекомендациям ВМО (Manual..., 2004).

Все методы химического анализа оформлены в виде руководящих документов и методических указаний (Руководство по контролю загрязнения атмосферы, 1991) и постоянно совершен-

ствуются с переводом на более современные инструментальные измерения. По Российской Федерации на проведение измерений состава осадков направлены усилия 13 лабораторий, расположенных в различных регионах страны.

В 60-е годы ведущие специалисты ГГО О. П. Петренчук и Н. Н. Александров разработали, а сотрудники лаборатории внедрились в практику счетчики ядер конденсации и устройства для сбора твердых и жидких облачных элементов с целью измерения их химического состава. Впервые в мировой практике была создана сеть пунктов по самолетному зондированию атмосферы с целью измерения вертикального распределения концентрации ядер конденсации и сбора проб облачной воды на химический анализ. Наблюдения проводились параллельно и стали регулярными (Петренчук, 1979).

Химическая лаборатория имеет большой опыт как в проведении химического анализа разбавленных растворов (ХСО), так и в определении химического состава поверхностных и грунтовых вод, снежного покрова, аэрозолей. Лаборатория аккредитована для проведения подобных наблюдений. В рамках названных работ в течение нескольких лет осуществлялись измерения коррозионной активности атмосферы (Петренчук, 1977).

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова была первым институтом в нашей стране, который с начала 70-х годов организовал в рамках международных программ БАПМОН (в настоящее время сеть Глобальной службы атмосферы — ГСА ВМО) регулярные экспериментальные исследования в области мониторинга состояния атмосферы на фоновом уровне, т. е. вне зон непосредственного влияния промышленных источников. Была создана сеть так называемых фоновых станций.

Станции ГСА обычно расположены в отдаленных местах (в горах, на островах) с очень низким уровнем загрязнения окружающей среды, характерным для больших географических территорий. Были разработаны критерии выбора местоположения станций мониторинга фоновых (природного) состояния атмосферы (Селезнева, 1978; Селезнева и др., 1979). В течение десятилетий на них измеряется широкий спектр атмосферных характери-

стик, позволяющий уловить глобальные изменения климата. С начала 70-х годов наблюдения за химическим составом осадков входят в обязательную программу наблюдений международной сети фонового мониторинга атмосферы БАПМОН (ГСА ВМО) (Strategy..., 2001).

На территории нашей страны вначале были организованы наблюдения на пяти фоновых станциях: Усть-Вымь (Республика Коми), Шаджатмаз (Северный Кавказ), Памятная (Курганская область), Туруханск (Красноярский край), Хужир (о. Ольхон на оз. Байкал). В дальнейшем их число увеличилось за счет биосферных заповедников: Воронежский (в центре ЕТР), Приокско-Террасный (в центре ЕТР), Кавказский (в западной части Кавказа), Баргузинский (в северо-восточной части оз. Байкал), Сихотеллинский (в Приморье).

Большое значение придается обеспечению достоверности информации. Лаборатория является постоянным участником международной программы интеркалибрации, организацией QA/SAC (Quality Assurance/Science Activity Center, State University of New York in Albany, New York) ВМО для стран, на территории которых имеются станции, включенные в сеть ГСА ВМО.

Одновременно Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова является национальным научно-методическим центром по мониторингу ХСО и осуществляет постоянное руководство сетью, выполняющей наблюдения за концентрацией веществ в атмосферных осадках. Лаборатория — постоянный участник курсов повышения квалификации специалистов подразделений Росгидромета, регулярно подготавливает и издает методические письма, обобщающие деятельность национальной сети мониторинга ХСО (см., например, Методическое письмо (2008)). Эта же лаборатория является и центром сбора, анализа, контроля и обобщения информации.

Одним из источников сведений о состоянии загрязнения атмосферы являются сведения о химическом составе атмосферных осадков. Данные сети мониторинга кислотности и химического состава атмосферных осадков используются для установления общего уровня атмосферного загрязнения, выяснения его дина-



мики, оценки переноса веществ в атмосфере, определения сезонной и суммарной нагрузки содержащихся в осадках химических соединений на подстилающую поверхность. При этом примеси, содержащиеся в осадках, рассматриваются как индикатор загрязнения определенного слоя атмосферы. Это приобретает особое значение для тех территорий, на которых другие виды наблюдений за загрязнением атмосферы не проводятся.

Обобщение результатов многолетних наблюдений за химическим составом атмосферных осадков позволило Е. С. Селезневой (Селезнева, 1967) составить карты распределения основных примесей в осадках по территории СССР и высказать гипотезу о том, что качественный и количественный химический состав атмосферных осадков определяется физико-географическими особенностями территории, на которой выпадают осадки. В дальнейшем было установлено, что химический состав осадков в равной степени отражает все основные уровни круговорота веществ в природе: глобальный, региональный и локальный.

На основе данных о химическом составе атмосферных осадков впервые введено понятие регионального фонового уровня загрязнения воздуха и проведена оценка баланса серы в атмосфере, определены зоны распространения морских солей в различных физико-географических районах (Петренчук, 1977).

Информация о химическом составе атмосферных осадков ежегодно представляется в таких изданиях Росгидромета, как «Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации» и «Обзор фонового состояния природной среды на территории стран СНГ» (см., например, Обзор загрязнения... (2007)). Результаты исходных 50-летних измерений химического состава осадков опубликованы до 2000 г. в специальных сборниках (см., например, работу Свистова (2006)).

Лаборатория принимала участие в российско-финско-норвежском проекте «Экогеохимия Баренцева региона». В период с мая 2000 г. по июнь 2001 г. в рамках этого проекта на 30 метеорологических станциях, расположенных на территории Северо-Западного федерального округа России (25 станций) и в Финляндии (пять станций), ежемесячно отбирались пробы атмо-

сферных осадков. В число 25 российских станций была включена и станция в п. Воейково, где и располагается лаборатория химического анализа атмосферных осадков ГГО. Некоторые итоги эксперимента опубликованы в *Geochemical Atlas* (2004) и работе Першиной, Полищук (2008).

Анализ результатов 15-летних наблюдений за содержанием основных компонентом (серы, азота и величиной рН) в атмосферных осадках на территории Российской Арктики позволил сделать вывод о том, что в последние годы не отмечается тенденции увеличения закисления осадков в этой зоне России. Осадки с повышенной кислотностью выпадают только на территории Кольского полуострова (Perskina, Polischuk, Svistov, 2006; Першина, Полищук, Свистов, 2008).

При методологическом руководстве специалистов кафедры аналитической химии Ленинградского государственного университета все методы химического анализа атмосферных осадков были разработаны и внедрены сотрудниками ГГО: В. М. Дроздовой, Р. Ф. Лавриненко, П. Ф. Свистовым, Т. Г. Бондаренко, Л. А. Васильченко, Н. А. Першиной, М. Т. Павловой. В разное время в лаборатории работали: Л. И. Неввонен, Е. В. Савельева, А. М. Бавыкина, М. А. Богданова (Кузнецова), Л. И. Буряк, Л. П. Грязновская, О. Н. Ефимова, М. А. Беяшова, В. А. Ионин, Э. И. Каява, Т. А. Максимова (Грибкова), Г. М. Святкина, Л. Э. Туху (Устинова), Н. В. Нестерова, М. В. Чистякова.

По результатам измерений химического состава осадков и аэрозолей были защищены две докторские и семь кандидатских диссертаций, выполнено десять дипломных работ. За разработку новых и совершенствование действующих методов анализа было получено восемь авторских свидетельств. В целом сотрудниками лаборатории опубликованы три монографии и около 300 работ в различных сборниках.

В заключение отметим, что исследования состава атмосферных вод (облаков и осадков) и аэрозолей продолжают в Информационно-аналитическом центре ОИМЗА при ГГО под руководством А. И. Полищук.

Обобщение результатов макромасштабных наблюдений позволяет охарактеризовать естественный фон загрязнения атмосферы и выяснить вклад различных источников. Дальнейшее развитие исследований должно быть направлено на изучение динамики этого фона, а также физико-химических процессов, происходящих в атмосфере. Комплекс всех этих исследований поможет сформулировать наиболее рациональные приемы защиты воздуха от загрязнений с использованием естественного самоочищения атмосферы.

Комплекс всех этих исследований и составляет неотложные задачи важного раздела метеорологии — химии атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данные по химическому составу атмосферных осадков и общему содержанию озона в атмосфере в различных пунктах СССР (материалы МГГ и МГС за 1957 и 1959 гг.), 1961 / Под ред. Е. С. Селезневой, Г. П. Гущина. — Л.: Гидрометеоиздат, с. 5—14.

Методическое письмо, 2008. Состояние работ по наблюдению за химическим составом и кислотностью атмосферных осадков в 2007 г. — СПб., ЦНИТ «АСТЕРИОН». — 54 с.

Обзоры загрязнения природной среды в Российской Федерации за 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002 гг. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003.

Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2006 гг., 2007. — М.: Метеоагентство Росгидромета, с. 41—43.

Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2003 год, 2005. — СПб.: Гидрометеоиздат.

Першина Н. А., Полищук А. И., Свистов П. Ф., 2008. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике. — Труды ГГО, вып. 558, с. 211—232.

Першина Н. А., Полищук А. И., 2008. Оценка химического состава атмосферных осадков на территории Северо-Западного федерального округа России и Финляндии по результатам международного российско-финско-норвежского проекта «Экогеохимия Баренцева региона». — Труды ГГО, вып. 558, с. 233—251.

Петренчук О. П., 1977. Оценка коррозионной агрессивности атмосферы в прибрежных районах. — Труды ГГО, вып. 387, с. 116—121.

Петренчук О. П., 1979. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. — Л.: Гидрометеоиздат, 264 с.

Руководство по контролю загрязнения атмосферы, 1991. РД 52.04.189—89. — Л.: Гидрометеоиздат, с. 468—508, 532.

Свистов П. Ф., Першина Н. А., Полищук А. И., 2006. Ежегодные данные по химическому составу атмосферных осадков за 1996—2000 гг. Обзор данных. — М.: Метеоагентство Росгидромета. — 226 с.

Селезнева Е. С., 1957. Изучение ядер конденсации и химических примесей в осадках в период Международного геофизического года. — Информ. сборник Комитета ГУТМС по проведению МГГ. — Л.: Гидрометеоздат, № 3, с. 44—49.

Селезнева Е. С., 1967. Исследования ядер конденсации и химического состава атмосферных осадков. — В сб.: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова за 50 лет Советской власти. — Л.: Гидрометеоздат, с. 41—250.

Селезнева Е. С., 1979. Вымывание осадками и баланс серы в атмосфере промышленного района. — Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, т. 15, № 4, с. 408—417.

Селезнева Е. С., 1978. О постановке исследований фоновых характеристик загрязнения атмосферы. — Метеорология и гидрология, № 1, с. 40—48.

Селезнева Е. С., Зайцев А. С., Русина Е. Н., Петренчук О. П., Шварц Я. М., 1979. О критериях выбора и рекомендациях по местоположению станций мониторинга фоновое загрязнение атмосферы. — Труды ГГО, вып. 418, с. 3—19.

Химический состав атмосферных осадков на Европейской территории СССР, 1964. / Под ред. Е. С. Селезневой. — Л.: Гидрометеоздат. — 209 с.

Чистякова М. В., Першина Н. А., Павлова М. Т., 2001. Химический состав атмосферных осадков. — В сб.: Современные исследования Главной геофизической обсерватории. Юбилейный сборник. Т. 2. — СПб.: Гидрометеоздат.

Geochemical Atlas of the Eastern Barents Region., 2004 / R. Salminen et al. eds. — Elsevier.

Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme, 2004. Guidelines, data quality objectives and standard operating procedures. — WMO GAW, No. 160. — 170 p.

Pershina N. A., Polischuk A. I. Svistov P. Ph., 2006a. Arctic pollution 2006. Acidification and Arctic haze. — Oslo, p. 7.

Pershina N. A., Polischuk A. I. Svistov P. Ph., 2006b. AMAP Assessment 2006: Acidifying pollutants, Arctic haze, and acidification in the Arctic. — Oslo, p. 17—20.

Strategy for the Implementation of the Global Atmosphere Watch Programme (2001—2007), 2001. A Contribution to the Implementation of the WMO Long-Term Plan. — WMO, GAW, No. 142 (WMO TD — No. 10787). — 82 p.

## **Валентин Петрович Мелешко**

*К 75-летию со дня рождения*

29 октября исполнилось 75 лет ведущему ученому в области теории климата и гидродинамического моделирования атмосферных процессов, доктору физико-математических наук, Заслуженному деятелю науки РФ Валентину Петровичу Мелешко.

Валентин Петрович Мелешко поступил в Главную геофизическую обсерваторию им. А. И. Воейкова в 1957 г. после окончания Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адмирала С. О. Макарова. С начала своей научной деятельности В. П. Мелешко способствовал широкому внедрению численных методов в метеорологические исследования. На этапе своего научного становления он внес существенный вклад в исследования, посвященные объективному анализу и прогнозу полей влажности, облачности и осадков. В 1964 г. В. П. Мелешко защитил кандидатскую, а в 1982 г. докторскую диссертацию.

В середине 1970-х годов В. П. Мелешко возглавил в ГГО работы по созданию моделей общей циркуляции атмосферы для исследований в области теории климата и долгосрочного прогноза погоды. Под руководством В. П. Мелешко и при его активном участии в ГГО была разработана сначала полусферная, а затем глобальная модель общей циркуляции атмосферы. Эта модель прошла всесторонние испытания в рамках международных проектов AMIP, MONEG, FANGIO, SMIP2, SMIP2/HFP и др., по результатам которых вошла в число лучших современных гидродинамических моделей атмосферы. За цикл работ «Глобальная спектральная модель атмосферы — верхнего слоя океана и ее использование в исследованиях естественных и антропогенных изменений климата» В. П. Мелешко и коллективу сотрудников ГГО присуждена ведомственная премия Росгидромета имени А. И. Воейкова.

На протяжении ряда лет В. П. Мелешко возглавляет в Росгидромете работы по исследованию естественных и антропогенных глобальных изменений климата с помощью физически полных моделей океан—атмосфера—криосфера.

В последние годы в ГГО под руководством В. П. Мелешко разработана новая версия глобальной модели атмосферы T63L25, предназначенная для прогноза режимов циркуляции, термического режима и осадков на сроки от месяца до сезона. По сравнению с ранее использовавшейся версией (T42L14) новая модель имеет в два раза более высокое спектральное и вертикальное разрешение. Технология глобальных ансамблевых прогнозов по модели T63L25 реализована на новом вычислителе, введенном в эксплуатацию в начале 2008 г. в рамках программы модернизации Гидрометслужбы РФ. На этом многопроцессорном вычислительном комплексе проведены также испытания океанического блока климатической модели ГГО для заданных атмосферных граничных условий, полученных из экспериментов по длительному интегрированию совместной модели океан—атмосфера NCAR. Проведено тестирование модели более высокого пространственного разрешения T42L25, предназначенной для использования в совместной глобальной модели океан—атмосфера—криосфера. Проведено пилотное исследование, основанное на большой серии экспериментов с моделью атмосферы для периода 1980—1999 гг., с целью уменьшения систематических ошибок в модели T42L25. Введенная на основе этого исследования коррекция расчетов потоков радиации в атмосфере и потоков тепла и влаги на подстилающей поверхности океанов и континентов позволила заметно повысить успешность расчета современного климата в тропосфере и, особенно, в стратосфере.

В целях более глубокого изучения регионального климата по инициативе и под руководством В. П. Мелешко начаты и успешно развиваются работы по созданию и использованию региональной модели для исследования климата отдельных регионов России.

Большое практическое значение имеют возглавляемые В. П. Мелешко работы по созданию и совершенствованию гидродинамико-статистического ансамблевого метода долгосрочного метеорологического прогноза на месяц на базе разработанной в ГГО глобальной модели общей циркуляции атмосферы. Возглавляемая В. П. Мелешко группа, занимающаяся исследованиями в области долгосрочного прогнозирования, активно участвует в международной

программе APCN по созданию мультимодельной системы сезонных прогнозов для азиатско-тихоокеанского региона.

В. П. Мелешко стал инициатором подготовки первого в нашей стране обобщения работ по изменению климата в России в XX веке, получившего название «Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации». Он же возглавил работы по подготовке 1-го тома этого доклада «Изменения климата». Опубликованный в 2008 г. «Оценочный доклад» обобщает результаты новейших отечественных и зарубежных исследований в области современных изменений климата России и ожидаемых его изменений в ближайшие десятилетия и в более отдаленной перспективе. По объему представленных материалов и многообразию рассмотренных вопросов издание не имеет аналогов. За подготовку «Оценочного доклада» коллектив ведущих авторов отмечен в 2009 г. ведомственной премией Росгидромета.

В. П. Мелешко является авторитетным международным экспертом в области исследования климатических процессов. В 1969—1973 и 1981—1986 гг. он работал в Объединенной группе планирования ВМО/МСНС в Женеве, где активно занимался вопросами организации и международной координации исследований в рамках Программы исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) и Всемирной программы исследования климата (ВПИК). В настоящее время как член рабочей группы I Межправительственного совета по изменению климата он участвует в подготовке обзоров текущего состояния климатической системы и прогнозов ее изменений для организаций ВМО и ЮНЕП, входящих в ООН.

В. П. Мелешко является членом Объединенного научного комитета ВПИК ВМО/МСНС/МОК, руководящего комитета по глобальной системе наблюдений за климатом ВМО/ЮНЕСКО/ЮНЕП/МСНС, руководящего комитета международной программы APCN, международной группы экспертов ВПИК по моделированию, а также ряда научных советов по национальным научно-исследовательским программам.

В. П. Мелешко активно участвует в деятельности Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК),

получившей в 2007 г. Нобелевскую премию Мира. Он был ведущим автором первых трех оценочных докладов МГЭИК, рецензентом четвертого доклада, а в настоящее время вновь в качестве ведущего автора участвует в подготовке специального доклада МГЭИК об альтернативных источниках энергии.

Большую работу В. П. Мелешко выполняет как член редколлегии журналов «Метеорология и гидрология» и «Climate Dynamics».

Возглавляя ГГО с 1994 по 2007 г., В. П. Мелешко сделал все возможное для сохранения основных направлений работ Обсерватории, расширения фундаментальных научных исследований, активизации хозяйственной деятельности.

В настоящее время В.П.Мелешко руководит отделом динамической метеорологии ГГО. Выполняемые под руководством В. П. Мелешко исследования отличаются высочайшим уровнем исполнения, глубиной проникновения в существо рассматриваемых проблем, оригинальностью и технологичностью реализуемых методов и технологий.

Коллектив сотрудников Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова сердечно поздравляет Валентина Петровича Мелешко с юбилеем и желает ему доброго здоровья, неиссякаемой энергии и новых творческих успехов!



## **Александр Сергеевич Зайцев**

### *К 70-летию со дня рождения*

13 июля исполнилось 70 лет Александру Сергеевичу Зайцеву, специалисту в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды, кандидату физико-математических наук.

А.С. Зайцев родился в 1939 г. в г. Петрокрепость Ленинградской области.

В 1961 г. он окончил Ленинградский гидрометеорологический институт по специальности инженер-метеоролог, а в 1966 г. защитил диссертацию по специальности «физика пограничного слоя атмосферы» в Ташкентском государственном университете. А. С. Зайцев начал работать в ГГО в 1961 г. В 1965—1966 гг. он являлся сотрудником Среднеазиатского гидрометеорологического института (Ташкент), а в 1977—1985 и 1992—2003 гг. работал во Всемирной метеорологической организации (Женева).

Работая в разные годы в ВМО, А. С. Зайцев занимал высокие посты: от директора департамента до заместителя генерального секретаря ВМО. В область его ответственности входили разработка программы и бюджета ВМО, ориентированного на конечные результаты, долгосрочное планирование, коммерциализация гидрометеорологического обслуживания, техническое сотрудничество, образование и подготовка кадров.

А. С. Зайцев является специалистом в области исследований пограничного слоя атмосферы, трансформации метеорологических параметров при изменении характеристик подстилающей поверхности, мониторинга загрязнения приземного слоя атмосферы промышленными выбросами.

А. С. Зайцев обладает исключительным опытом организации и проведения международных проектов по модернизации национальных метеорологических служб, организации международных проектов по отдельным вопросам деятельности метеорологических служб, систем управления качеством гидрометеорологических данных, продукции и обслуживания.

В настоящее время А. С. Зайцев является главным специалистом ГГО по международным научно-техническим программам:

он координирует участие ГГО в международных программах и проектах, участвует в подготовке и проведении международных выставок и представительных форумов самого высокого ранга. Он продолжает участвовать в международной деятельности Росгидромета, являясь членом Управляющего комитета ГСНК (ВМО) и членом целевой группы по структуре управления качеством ВМО.

Свое 70-летие Александр Сергеевич встретил в расцвете творческих сил и планов. Коллектив Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова от души поздравляет Александра Сергеевича с юбилеем, желает ему доброго здоровья, энергии и многих лет плодотворной деятельности на благо отечественной метеорологической науки.

**Марк Евсеевич Берлянд**  
**1919—2006**

*К 90-летию со дня рождения*

Марк Евсеевич Берлянд родился 28 октября 1919 г. в городе Каневе на Украине. Высшее образование он получил на физическом факультете Киевского, а затем Свердловского университета. Уже в студенческие годы М. Е. Берлянд проявил большие способности к научной деятельности. Так, еще будучи студентом Киевского университета, он сдал экзамены по теоретической физике в научной школе Л. Д. Ландау (так называемый Ландау-минимум).

В 1942 г. по окончании Свердловского университета М. Е. Берлянд поступил на работу в Главную геофизическую обсерваторию (ГГО), входившую тогда в состав Вооруженных сил и находившуюся во время Великой Отечественной войны в Свердловске. В ГГО М. Е. Берлянд проработал 64 года — до конца жизни. В военные годы он занимался теоретическими и экспериментальными исследованиями метеорологических аспектов проблем военной химии, учет которых необходим при ликвидации последствий применения химического оружия, постановке дымовых завес и решении ряда других задач.

В 1945 г. М. Е. Берлянд защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в которой была развита теория изменения в пограничном слое атмосферы скорости и направления ветра с высотой. В 1955 г. он защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, посвященную вопросам предсказания и регулирования теплового режима приземного слоя атмосферы. В 1956 г. на ее основе им была написана получившая широкую известность фундаментальная монография «Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы». В 1961 г. М. Е. Берлянд в составе авторского коллектива был удостоен премии им. А. И. Воейкова за монографию «Туманы».

В 1963 г. М. Е. Берлянд возглавил вновь созданный в ГГО отдел исследований атмосферной диффузии и загрязнения воздуха

(ОИАД и ЗА), которым он руководил более 30 лет. Численность сотрудников этого отдела в отдельные годы превосходила 120 человек. Уникальный по широте изучаемой проблематики и ее роли в масштабах страны отдел обеспечивал и, по существу, продолжает до настоящего времени обеспечивать выполнение возложенной на ГГО функции головной организации по вопросам изучения и предотвращения загрязнения атмосферного воздуха.

Исследования отдела под руководством М. Е. Берлянда заложили основу для решения широкого круга научных и практических задач, базирующихся, прежде всего, на теоретических работах по математическому и физическому моделированию процессов турбулентной диффузии атмосферных примесей. М. Е. Берлянд впервые в мировой практике инициировал широкое применение численных методов решения математических уравнений, описывающих процесс атмосферной диффузии. В числе первых полученных отделом практических результатов необходимо отметить разработку «Временной методики расчетов рассеяния в атмосфере выбросов (золы и сернистого газа) из дымовых труб электростанций», утвержденной в 1963 г. Государственным комитетом СССР по координации научно-исследовательских работ (ГК КНИР). Эта работа стала прообразом ряда последующих общегосударственных нормативных документов по расчету загрязнения атмосферного воздуха и нормированию выбросов вредных веществ в атмосферу.

Разработке этого общегосударственного нормативного документа предшествовало проведение отделом четырех крупных комплексных экспедиций на Щекинскую тепловую электростанцию (ТЭС) в Тульской области. Наряду с метеорологами в этих экспедициях участвовали специалисты по теплоэнергетике и гигиене атмосферного воздуха.

Экспериментальные данные подтвердили достаточную точность расчетных формул «Временной методики...», использование которой начиная с шестидесятых годов прошлого столетия сыграло существенную роль в обеспечении строительства в СССР большого числа мощных ТЭС.

В 1967, 1974 и 1986 гг. под научным руководством М. Е. Берлянда были подготовлены еще три сменявших друг друга и распространявшихся на все более широкий круг вопросов общегосударственных нормативных документа: СН 369-67, СН 369-74 и ОНД-86. Отметим, что ОНД-86 до настоящего времени широко применяется как один из основных нормативных документов по охране атмосферного воздуха от загрязнения в России и в большинстве стран, входивших в состав СССР, а также в ряде других стран. По широте регламентируемых ОНД-86 вопросов, в том числе в плане многообразия типов рассматриваемых источников выбросов вредных веществ в атмосферу, учета фоновых концентраций, рельефа местности, промышленной застройки и др., ОНД-86 до настоящего времени не имеет себе равных в мире.

Сначала СН 369-74, а затем ОНД-86 предусматривали разработку на их основе унифицированных программ расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА), которые могут применяться только после их тестирования и согласования с ГГО. Тысячи УПРЗА, разработанных различными организациями, в настоящее время широко применяются как в России, так и за рубежом. ОНД-86 и базирующиеся на его расчетной схеме программные средства используются, в частности, при разработке предпроектной и проектной промышленной документации, нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) вредных веществ в атмосферу, градостроительных мероприятий и др. Этот нормативный документ получил широкую известность в мировом научном сообществе.

Наряду с глубокими теоретическими исследованиями процессов переноса, рассеяния и выпадения атмосферных примесей, М. Е. Берлянд, как уже отмечалось, с самого начала работы руководимого им отдела существенное внимание уделял экспериментальному изучению процессов атмосферной диффузии в целях, прежде всего, обоснования нормативных расчетных методов.

Всего начиная с 1961 г., за период продолжительностью около 25 лет, отдел исследований атмосферной диффузии и загрязнения воздуха совместно с гигиеническими, техническим и другими институтами и организациями провел около 40 (по одной-две в год) крупных комплексных экспедиций, включавших де-

тальные метеорологические измерения (в том числе с использованием самолетов и вертолетов), определение параметров источников выброса и подфакельные измерения концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе. Экспедиции проводились в центральной России и Поволжье, на Украине, в Молдавии, Сибири и Средней Азии сначала на ТЭС, а затем на предприятиях по производству химического волокна, алюминия и др. С участием специалистов ГГО были проведены комплексные эксперименты в Болгарии, Монголии и Чехословакии.

В ряде экспедиций в России, Армении, Молдавии и на Украине изучались закономерности загрязнения атмосферного воздуха как в городах, так и за их пределами, в том числе вблизи крупных автомагистралей (в частности, в советско-американском эксперименте "Autoex"), в условиях сложного рельефа и др. Использовались также экспериментальные данные о загрязнении атмосферного воздуха от выбросов ТЭС и автотранспорта, полученные в США и некоторых европейских странах.

В семидесятые — девяностые годы прошлого столетия по инициативе М. Е. Берлянда существенное внимание было уделено физическому моделированию с использованием аэродинамических труб воздушных потоков при наличии выраженных форм рельефа (возвышенностей, впадин). Сначала эти работы проводились в аэродинамических трубах Ленинградского кораблестроительного института и Института механики МГУ им. М. В. Ломоносова. Затем большой комплекс работ по физическому моделированию процессов влияния рельефа местности на воздушные потоки и диффузионные параметры был проведен с использованием большой метеорологической аэродинамической трубы Агентства по охране окружающей среды США в штате Северная Каролина. Для участия в этих работах в США на длительное время выезжали сотрудники ОИАД и ЗА. Полученные результаты были применены, в частности, при совершенствовании методики учета влияния рельефа местности при расчетах загрязнения атмосферного воздуха.

М. Е. Берлянд был инициатором и научным руководителем большого числа работ общегосударственного масштаба, направ-

ленных на охрану атмосферного воздуха от загрязнения. К их числу относится создание в 1963 г. в системе Гидрометслужбы СССР сети постов, на которой начали проводиться систематические измерения концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе, а также ряда обеспечивающих работу этой сети химических лабораторий. В ОИАД и ЗА были организованы сбор, анализ и обобщение результатов полученных экспериментальных данных. В 1965 г. было начато составление ежегодных Обзоров (позднее Ежегодников) состояния загрязнения атмосферного воздуха на территории нашей страны.

С самого начала функционирования Общегосударственной службы наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха ОИАД и ЗА осуществлял научно-методическое руководство ее работой. Для этого, в частности, в отделе была создана химическая лаборатория. Возглавляемый М. Е. Берляндом отдел постоянно осуществлял научно-методическое руководство общегосударственной сетью наблюдений за химическим составом атмосферных осадков.

В 1979 и 1991 гг. были опубликованы подготовленные в ОИАД и ЗА совместно с рядом гигиенических и других институтов и организаций фундаментальные «Руководства по контролю загрязнения атмосферы».

С 1971 г. под научно-методическим руководством ОИАД и ЗА в прогностических подразделениях Гидрометслужбы начались работы по краткосрочному прогнозу загрязнения воздуха в городах. Прогнозы о наступлении неблагоприятных (для рассеяния атмосферных примесей) метеорологических условий передавались промышленным предприятиям, которые получили возможность заблаговременно подготовиться к регулированию (временному сокращению или даже прекращению) выбросов вредных веществ в атмосферу. Методология разработки этих прогнозов сначала была изложена в «Руководстве по контролю загрязнения воздуха в городах» (1979), а затем в «Методических указаниях по прогнозированию загрязнения атмосферного воздуха с учетом метеорологических условий» (1986) и «Руководстве по прогнозу загрязнения воздуха» (1993).

Все указанные работы в системе Росгидромета продолжают успешно развиваться и в настоящее время.

Помимо упомянутых выдающихся достижений М. Е. Берлянда в плане обеспечения развития атмосфероохранной деятельности в подразделениях Гидрометслужбы, он был научным руководителем работ по методологии нормирования выбросов вредных веществ в атмосферу, проводившихся в ГГО более десяти лет. В этот период под научным руководством М. Е. Берлянда был разработан ГОСТ 17.2.3.02—78 «Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями».

До настоящего времени ГОСТ является основным нормативным документом по нормированию выбросов вредных веществ в атмосферу. Для внедрения требований этого ГОСТа отдел обеспечил разработку ряда нормативно-методических документов. Большая часть этих документов, многие из которых используются и в настоящее время, были разработаны по Общегосударственной программе 0.85.04 НИОКР Государственного комитета СССР по науке и технике (ГКНТ). М. Е. Берлянд был научным руководителем этих работ, в которых в 1981—1990 гг. участвовало около 130 научно-исследовательских и проектных институтов, вузов, КБ и других организаций.

В 1959 г. М. Е. Берлянду было присвоено звание профессора. Под его руководством было подготовлено 35 кандидатов наук, а четверо сотрудников отдела защитили докторские диссертации.

За время работы в ГГО М. Е. Берляндом было опубликовано более 280 научных работ, в том числе 15 монографий и книг, посвященных закономерностям процессов, протекающих в пограничном слое атмосферы, теоретическому и экспериментальному изучению закономерностей диффузии атмосферных примесей, методам расчета загрязнения атмосферного воздуха и проблемам мониторинга окружающей среды. Из них следует, прежде всего, отметить монографию «Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы» (1975), переведенную на английский и немецкий языки, и монографию «Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы» (1985), переведенную на английский, китайский и японский языки.



М. Е. Берлянд активно участвовал в международном научном сотрудничестве. В течение ряда лет он был председателем действовавшей при ГГО Рабочей группы стран—участников СЭВ по метеорологическим аспектам загрязнения атмосферы (РГ МАЗА). В соответствии с решениями РГ МАЗА проводились научные семинары, координационные совещания, лабораторные и натурные испытания и сопоставления приборов и методов.

С 1972 г. в течение длительного времени активно функционировала Рабочая группа, обеспечивавшая научное сотрудничество Гидрометслужбы и других ведомств СССР с Агентством по охране окружающей среды США. От советской стороны работой этой Рабочей группы руководил М. Е. Берлянд. Эта Рабочая группа проводила совещания специалистов обеих стран и совместные мероприятия. В частности, были проведены совместные эксперименты в большой аэродинамической трубе Агентства по охране окружающей среды США, эксперименты на Кавказе по оценке возможностей образования естественных фотохимических смогов, эксперименты в Вильнюсе и Ленинграде по изучению загрязнения атмосферного воздуха выбросами на крупных автомагистралях.

М. Е. Берлянд активно участвовал в научном сотрудничестве ГГО и других отечественных организаций с научными институтами Великобритании, Германии, Финляндии, Франции, Швеции и ряда других стран, причем как в рамках программ двустороннего сотрудничества, так и по линии Всемирной метеорологической организации. При активном участии М. Е. Берлянда ГГО организовала ряд крупных международных симпозиумов и совещаний. Так, в Ленинграде в 1977 г. был проведен симпозиум, в котором участвовали специалисты 25 стран, а в 1986 г. — конференция ВМО «Моделирование загрязнения атмосферного воздуха и его применение».

В 1991 г. М. Е. Берлянду было присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники». Указом Президента РФ за большой вклад в развитие гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды и многолетний добросовестный труд М. Е. Берлянд был награжден орденом Почета. Он имел еще девять других государственных наград.

Выдающийся ученый в области физики пограничного слоя атмосферы и охраны атмосферного воздуха от загрязнения, заслуженный деятель науки и техники СССР, доктор физико-математических наук, профессор Марк Евсеевич Берлянд скончался 13 марта 2006 г. на семьдесят седьмом году жизни.

В нашей стране и ряде других стран Марк Евсеевич Берлянд получил широкую известность как выдающийся ученый и организатор науки, всегда доводивший результаты исследований до широкого практического применения. Память о нем навсегда сохранится в наших сердцах.

## Памяти Семена Михайловича Гальперина

1926 — 2009

Отечественная гидрометеорология понесла большую утрату. 27 сентября 2009 г. после продолжительной тяжелой болезни на 84 году жизни скончался известный ученый-экспериментатор, кандидат технических наук, заведующий отделом Филиала ГГО им. А. И. Воейкова НИЦ ДЗА Семен Михайлович Гальперин.

С. М. Гальперин родился 5 мая 1926 г. в г. Зяслав Каменец-Подольской области УССР. В 1932 г. он вместе с родителями переехал в Ленинград, где до конца 1941 г. учился в средней школе. Затем семья была эвакуирована сначала в село Некрасово Ярославской области, затем в Алтайский край. В июле 1943 г. С. М. Гальперин был мобилизован и стал курсантом 1-й школы младших авиаспециалистов ВВС Тихоокеанского флота. В декабре 1943 г., по окончании школы, он был направлен в одно из подразделений Тихоокеанского флота, где прослужил до 1947 г. С марта 1947 г. по февраль 1949 г. С. М. Гальперин — курсант Военно-Морского училища связи. Дальнейшую службу С. М. Гальперин проходил в авиационных частях Балтийского флота.

После окончания в 1958 г. Ленинградской военно-инженерной академии им. А. Ф. Можайского С. М. Гальперин был оставлен в ней для проведения научных исследований. Именно в период службы в армии раскрылся его талант ученого-экспериментатора. В конце 50-х годов прошлого века он вместе со специалистами ВНИИРА участвовал в разработке и полевых испытаниях первой отечественной двухдиапазонной радиолокационной метеорологической станции МРЛ-1. Он внес большой вклад в изучение недождевых облаков с использованием миллиметрового диапазона волн.

В конце 60-х — начале 70-х годов при исследовании грозовых облаков дистанционными техническими средствами ему совместно с коллегами впервые удалось обосновать, обнаружить и исследовать возможности и особенности применения метровых РЛС для изучения ионизированных каналов молний. Это открыло новый этап изучения грозовых облаков в нашей стране и за рубежом.

В 1966 г. С. М. Гальперин защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, которая была посвящена разработке и исследованию комплексного радиолокационно-пеленгационного метода обнаружения грозových облаков. С. М. Гальпериным совместно с коллегами был разработан, запатентован и внедрен автоматизированный грозопеленгатор, сопряженный с МРЛ.

В 1977 г. после демобилизации С. М. Гальперин начал работать в отделе радиометеорологических исследований ГГО, в котором он занимал должности ведущего научного сотрудника, заведующего лабораторией и заведующего отделом НИЦ ДЗА.

В ГГО С. М. Гальперин стал организатором и на протяжении многих лет научным руководителем экспериментальной базы в поселке Тургошь Ленинградской области. Созданный под его руководством уникальный комплекс активных и пассивных средств дистанционного зондирования атмосферы позволил в течение многих лет проводить экспериментальные исследования грозových облаков, развивающихся естественным образом и при активных воздействиях. Этот комплекс, включавший также самолет-лабораторию, обеспечивал управление процессом активных воздействий и получение физических параметров облаков с высоким пространственно-временным разрешением. Выполнявшиеся под руководством С. М. Гальперина исследования всегда отличались оригинальностью решений и четкой практической направленностью.

С. М. Гальперин является автором около 100 научных статей, опубликованных в России и за рубежом. Широкую известность среди специалистов получила его монография «Радиотехнические методы исследований гроз», написанная им в соавторстве. Совместно с коллегами С. М. Гальперин является обладателем пяти патентов на изобретения.

С. М. Гальперин активно участвовал в деятельности методического центра СЭВ по радиолокационной метеорологии, а также в метеорологическом обеспечении запусков отечественных космических аппаратов «Буран». Весомым являлся его вклад в деятельность научной школы «Радиолокационные исследования грозových облаков и возникающих в них ионизированных образо-

ваний, а также облаков экстремальных ситуаций (ядерные и обычные взрывы, аварии на АЭС, пожары)».

За большой вклад в отечественную гидрометеорологию С. М. Гальперин был награжден знаком «Почетный работник Гидрометслужбы РФ». Имеет правительственные награды: медаль «За боевые заслуги», медаль к ордену «За заслуги перед Отечеством» 2-й степени и 12 военных медалей.

Тяжело прощаться с этим высокопорядочным, чутким, отзывчивым человеком.

Добрая, благодарная память о Семене Михайловиче навсегда сохранится в сердцах коллег и друзей.

Сборник научных трудов

**Труды ГГО, вып. 560**

Подписано в печать 30.11.2009. Формат  $60 \times 84^{1/16}$ . Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 20,0. Тираж 300 экз. Заказ

Отпечатано в типографии ООО «САВОЖ».

195279, Санкт-Петербург, ш. Революции, 69, лит. А.

УДК 551.509

**Воспроизводимость Североатлантического колебания по результатам гидродинамических прогнозов на месяц и сезон, его предсказуемость и связь с качеством прогнозирования аномалий температуры воздуха на территории России.** Мирвис В. М., Мелешко В. П., Гаврилина В. М., Матюгин В. А., Львова Т. Ю. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 7—32.

По данным исторических серий гидродинамических месячных и сезонных прогнозов на основе двух версий модели общей циркуляции T42L14 и T63L14 выполнен анализ воспроизводимости и предсказуемости Североатлантического колебания (САК). Исследованы связи между состоянием САК и распределением аномалий температуры воздуха на территории России. Сделан вывод о возможности использования прогноза САК для улучшения месячных прогнозов температуры воздуха.

*Ключевые слова:* Североатлантическое колебание, индексы, модели общей циркуляции атмосферы, гидродинамические месячные и сезонные прогнозы, аномалии температуры воздуха на территории России.

Табл. 3. Ил. 7. Библ.15.

УДК 551.58.001.57

**Радиационный и термический режим атмосферы и климатическая система: индексы внешнего воздействия и их оценка.** Кароль И. Л., Фролькис В. А., Киселев А. А. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 33—50.

Потенциал глобального потепления (ППП, GWP) и предложенный недавно потенциал глобальной температуры (ПГТ, GTP) широко используются не только в научных исследованиях, но и в целом ряде экономических и политических оценок эффектов роста содержания парниковых газов и других факторов, формирующих современный климат и его изменения. Появились также новые индексы, требующие для их вычисления дополнительных сведений о количественных характеристиках составляющих климатической системы в разные периоды времени: 20, 100 и 500 лет. Предложены новые и усовершенствованные оценки, а некоторые индексы существенно уточняются.

Представлены и обсуждаются обзор состояния и направления дальнейшего развития указанных индексов, в частности для целей МГЭИК (IPCC) и для разработки нового продолжения Киотского протокола. Приведены оценки RF, ППП и ПГТ в зависимости от изменений содержания в атмосфере метана, NO<sub>x</sub> и сокращаемых в соответствии с Монреальским протоколом ХФУ. Предлагается ввести поправки на величину ПГТ при учете скорости обмена энергией между атмосферой и разными слоями океана, теплоемкость которых различается.

*Ключевые слова:* климат, индексы, парниковые газы.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 20.

УДК 551.58

**Современное состояние и перспективы развития работ в области прикладной климатологии.** Кобышева Н. В. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 51—67.

Изложены основные проблемы прикладной климатологии в современных условиях и указаны пути их решения. Уточнены определение и содержание предмета «прикладная климатология», а также основного понятия «специализированная климатологическая информация». Утверждается, что критериями принятия климатообусловленных решений в экономике являются приемлемость погодно-климатических рисков и обеспечение климатическими ресурсами. Подчеркивается опасность воздействия на технические системы роста повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды.

*Ключевые слова:* прикладная климатология, специализированная климатологическая информация, погодно-климатические риски.

Ил. 1. Библ. 16.

УДК 551.509.59

**Экономическая полезность использования метеорологических прогнозов в теплоэнергетике Москвы.** Хандожко Л. А., Тимофеева А. Г. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 68—88.

Рассмотрены некоторые аспекты использования гидрометеорологической информации для оптимизации производственной деятельности в теплоэнергетике. Раскрыты проблемы энергосбережения и повышения энергоэффективности, снижения энергоемкости производства тепловой энергии с использованием методических прогнозов как информационного ресурса экономики. Приведены некоторые результаты исследования экономической полезности (эффекта и эффективности) использования прогнозов температуры воздуха для теплоэнергетики Москвы за период 2003—2008 гг.

*Ключевые слова:* экономическая полезность, метеорологические потери, теплоэнергетика Москвы, энерго- и ресурсосбережение.

Табл. 3. Ил. 2. Библ. 13.



УДК 551.584

**Обоснование необходимости и принципы учета мезо- и микроклимата при комплексных оценках природных ресурсов с учетом различных отраслей экономики.** Пигольцина Г. Б. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 89—115.

На конкретных примерах показана значимость и обоснована необходимость учета мезо- и микроклиматической информации в различных секторах экономики с целью принятия оптимальных хозяйственных решений. Изложены основные принципы учета мезо- и микроклиматических особенностей территории при комплексных оценках природно-климатических ресурсов.

*Ключевые слова:* мезо- и микроклиматическая информация, сектора экономики, природно-климатические ресурсы.

Табл. 3. Ил. 5. Библ. 26.

УДК 551.510.04

**Фоновый уровень состояния атмосферы по многолетним данным о химическом составе атмосферных осадков.** Свистов П. Ф., Полищук А. И., Першина Н. А. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 116—142.

Дано представление о глобальном и региональном фоне минерализации атмосферных осадков. По данным многолетних наблюдений на национальной сети станций – региональных станций ГСА ВМО — показано, что в целом на территории России сохраняется фоновый уровень минерализации атмосферных осадков. Диапазон минерализации до 3 мг/л можно принять за глобальный фоновый состав осадков, а диапазон от 3 до 7 мг/л — за региональный с верхним пределом до 15 мг/л. На станциях ГСА в 70 % случаев с осадками суммарного азота выпадает больше, чем серы. По сравнению с серединой прошлого века относительное содержание серы уменьшилось примерно в три раза. Атмосферные осадки с повышенной кислотностью периодически выпадают на всех фоновых станциях России.

*Ключевые слова:* химический состав атмосферных осадков, фоновый уровень, кислотность, станции ГСА ВМО.

Табл. 4. Ил. 7. Библ. 10.

551.051.051

**Состояние и перспективы радиофизических исследований атмосферы и подстилающей поверхности.** Щукин Г. Г., Степаненко В. Д., Образцов С. П., Караваев Д. М., Жуков В. Ю., Рыбаков Ю. В. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 143-167.

Дан обзор радиофизических исследований атмосферы, выполненных в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова за последние 10 лет, направленных на разработку СВЧ-радиометрического метода температурно-влажностного зондирования атмосферы, температурного зондирования подстилающей поверхности, доплеровского метеорологического радиолокатора, оснащенного СВЧ-радиометром. Выполнен сравнительный анализ информативности спутниковых радиометров МТВЗА-ГЯ, МТВЗА-ОК, AMSU, предложены методики определения температуры поверхности по данным радиометра AVHRR NOAA.

Представлены результаты экспериментальных СВЧ-радиометрических исследований влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при различных метеоусловиях, в том числе в период опасных явлений, связанных с облаками. По результатам сравнительных экспериментов (международный эксперимент CLWA-NET и др.) исследованы погрешности СВЧ-радиометрических измерений, показано удовлетворительное согласие СВЧ-радиометрических данных и аэрологической информации.

Определены перспективные направления исследований, связанных с развитием методов сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений, контроля результатов АВ, оценки степени опасности обледенения ЛА.

*Ключевые слова:* уравнение переноса излучения в атмосфере, весовые функции, температура поверхности, влагозапас атмосферы, водозапас облаков, метод статистической регуляризации, СВЧ-радиометры, доплеровский радиолокатор.

Табл. 4. Ил. 6. Библ. 18.

УДК 551.509

**Некоторые аспекты исследования конвективных облаков и осадков.** Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д., Веремей Н. Е., Волков Н. Н., Куров А. Б., Пивоварова Л. В. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 168—188.

Представлены наиболее важные результаты исследований по физике конвективных облаков и активных воздействий на них, полученные за последнее десятилетие.

Развивались традиционные направления исследований: численное моделирование развития конвективных облаков при естественном развитии и при активных воздействиях, лабораторное моделирование фазовых переходов воды в облаках, исследование замерзания капель чистой воды и растворов солей, совершенствование оборудования.

Наряду с этим, развивались новые направления: создан новый прибор для измерения гололедно-изморозевых образований, исследовано влияние фуллероидных наночастиц на замерзание капель воды, разработана методика использования данных измерений спутника «Метеосат» для получения характеристик конвективных облаков. Продолжено исследование влияния коронных разрядов на фазовые и микроструктурные преобразования воды в облаках.

*Ключевые слова:* отдел физики облаков, теоретические исследования, экспериментальные исследования, численное моделирование, лабораторные эксперименты, активные воздействия, фазовые переходы воды, прибор измерения гололедно-изморозевых образований, фуллероидные наночастицы, спутниковые данные «Метеосат», коронный разряд.

Табл. 3. Ил. 5. Библ. 26.

УДК 551.509.6+551.594

**Активные воздействия на облачные системы с целью регулирования осадков и молниевой активности.** Гальперин С. М., Козлов В. Н., Степаненко В. Д., Щукин Г. Г. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 189—212.

Представлены результаты применения методов и технических средств активных воздействий на облака с целью предотвращения осадков при обеспечении благоприятных погодных условий в период проведения массовых мероприятий (защита мегаполисов). Выполнен анализ многолетних опытно-производственных работ по тушению лесных пожаров лесопатрульной авиацией в различных субъектах РФ с использованием йодистого серебра и гигроскопических веществ. Приведены результаты воздействий на электрическое состояние облаков, в результате которого создается токопроводящий канал от облака в направлении к поверхности Земли.

Обсуждаются перспективы применения новых технических средств и методов управления и контроля активных воздействий на облачные системы с целью регулирования осадков и молниевой активности.

*Ключевые слова:* активные воздействия, перераспределение осадков, метеозащита мегаполисов, лесные пожары, молниевая активность.

Табл. 4. Ил. 2. Библ. 19.

УДК 551. 594

**Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз.** Морозов В. Н., Попов И. Б., Снегуров А. В., Снегуров В. С., Соколенко Л. Г., Шварц Я. М. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 213—242.

Выполнен обзор исследований, проводившихся в отделе атмосферного электричества Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в течение последних десяти лет. Рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований в области атмосферного электричества и пеленгации гроз, а также перспективы дальнейшего их развития.

*Ключевые слова:* атмосферное электричество, пеленгация гроз.

Табл. 4. Ил. 4. Библ. 52.

УДК 551.576

**О возможностях и особенностях радиолокационного определения интенсивности дождей по ослаблению радиоволн.** Степаненко В. Д., Емельянова В. Н., Довгалюк Ю. А. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 243—254.

Рассматриваются физические основы, возможности и особенности определения интенсивности дождей по ослаблению радиоволн с помощью метеорадара, установленного на американско-японском ИСЗ TRMM. Для увеличения точности измеряемых значений интенсивности дождей, адекватных природным условиям, предлагается соответствующий расчетный способ.

*Ключевые слова:* дождь, интенсивность дождей, ИСЗ TRMM, метеорадар, ослабление радиоволн.

Табл. 2. Ил. 1. Библ. 10.

УДК 551.510.534

**Расчет общего содержания озона при автоматизированных измерениях по радиации от зенита ясного и облачного неба.** Соломатникова А. А. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 255—267.

Изложен метод расчета ОСО по свету от зенита ясного и облачного неба по результатам автоматизированных измерений спектрального состава ультрафиолетовой (УФ) радиации УФ озонным спектрометром (УФОС). Предложен способ автоматического введения поправок на облачность с использованием самих результатов измерений спектрального состава УФ радиации. Оценка влияния облачности производится на участке спектра УФ радиации вне полосы поглощения озона, и эта оценка экстраполируется на озонную область для введения коррекции на облачность при расчете ОСО.

*Ключевые слова:* автоматизированные измерения общего содержания озона, ультрафиолетовый озонный спектрометр, поправка на облачность, измерения по зениту облачного неба.

Ил. 5. Библ. 12.

УДК 551.5

**Исследование датчика гололедно-изморозевых отложений.** Зименков П. С.  
Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 268—276.

Рассматриваются устройство и принципы функционирования датчика пассивного типа; исследуется точность измерения основных свойств гололедно-изморозевых отложений.

*Ключевые слова:* датчик гололедно-изморозевых отложений, измерение слоя воды, измерение слоя льда, измерение температуры поверхности.

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 5.

УДК 551.509

**Reproducibility of the North Atlantic Oscillation as derived in the monthly and seasonal forecasts, and its predictability and connection with quality of air temperature anomalies forecasts in Russia.** Mirvis V. M., Meleshko V. P., Gavrilina V. M., Matyugin V. A., Lvova T. Yu. Proceeding of MGO. 2009. V. 560. P. 7–32.

An analysis of reproducibility and predictability of the North Atlantic Oscillation (NOA) for the monthly and seasonal hindcasts was conducted using two versions of the atmospheric general circulation models T42L14 and T63L25. Relationship between NOA and surface air temperature anomaly patterns in the Russia was studied. It was concluded that potential of NOA index prediction can be used in improvement of the monthly and seasonal forecasting.

*Keywords:* North Atlantic Oscillation, indices, atmospheric general circulation model, monthly and seasonal forecasts, air temperature anomaly.

Tab. 3. Fig. 7. Ref. 15.

УДК 551.58.001.57

**Radiative and thermal atmospheric regimes and climate system: indices of external impact and their evaluation.** Karol I. L., Frolkis V. A., Kiselev A. A. Proceeding of MGO. 2009. V. 560. P. 33–50.

The Global Warming Potential (GWP) and recent Global Temperature Potential (GTP) concepts are widely used not only for research but also for economical and even political evaluations of greenhouse gas and other climate forming factor effects in the current climatic change. The proposal to replace or add the GWP and Radiative Forcing (RF) by the GTP with usage of actual temperature of the ground surface air requires the additional information on the thermal sensitivity of the various parts of climatic system for different time periods of external actions. The proposed improvements of these climate parameters may and will be used in the current and future assessment in IPCC and other international reports.

The examples of RF, GWP, and GTP evaluation for methane, NO<sub>x</sub> and especially for halocarbons under the Montreal Protocol restrictions will be presented and discussed. The future development of the above presented indices in particular for the IPCC and the Kyoto Protocol purposes is proposed, together with some corrections to the GTP evaluation to account the energy exchange between the lower troposphere and the ocean layers having various heat capacity values.

*Keywords:* climate, indices, greenhouse gas.

Tab. 1. Fig. 2. Ref. 20.

УДК 551.58

**Current status and prospects for the development of applied climatology.**  
Kobysheva N. V. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 51—67.

Key problems that arise in applied climatology in the contemporary context are expounded and some ways of their solution are offered. Definition and subject matter of applied climatology as well as the concept of specialized climatological information are specified. Author maintains that criterions of decision making concerned with climate conditions are determined by the acceptability of weather and climate related risks and the supply of climate resources. Special emphasis is laid on the impact of rising frequency and intensity of the dangerous weather events on engineering systems.

*Keywords:* applied climatology, specialized climatological information, climate related risks.

Fig. 1. Ref. 16.

УДК 551.509.59

**Economical profit of use of meteorological forecasts in heat-and-power engineering of Moscow.** Handogko L. A., Timofeeva A. G. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 68—88.

Some aspects of use of the hydrometeorological information for optimization of industrial activity in heat and power engineering are considered. Problems of power savings and increase of power efficiency, decrease in power consumption of manufacture of thermal energy with use of methodical forecasts as information resource of economy are revealed. Some given researches of economic efficiency of forecasts of temperature of air for power system of Moscow during 2003—2008 are cited.

*Key words:* economical profit, meteorological loss, Moscow heat-and-power engineering, resource and energy saving.

Tabl. 3. Fig. 2. Ref. 13.



УДК 551.584

**Substantiation of the importance of meso- and microclimatic information accounting in nature resources complex estimations for different economic branches.** Pigoltsina G. B. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 89—115.

Importance and necessity of meso- and microclimatic information accounting in different economic branches with the aim to take optimal economic decisions are shown by concrete examples. The main calculating methods of meso- and microclimatic peculiarities of the specific territory in estimating of nature resources are made.

*Keywords:* meso- and microclimatic information, economic branches, nature resources.

Tab. 3. Fig. 5. Ref. 26.

УДК 551.510.04

**Background level the state of the atmosphere on the data on chemical precipitation.** Svistov P. Ph., Polischuk A. I., Pershina N. A. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 116—142.

According to the longtime observation at national stations network (regional stations GAW WMO) the background level of precipitation mineralization in general is the same. The scope of precipitation mineralization 3—7 mg/l can be taken as regional background content with high level up to 15 mg/l. At GAW WMO stations in 70 % of the total cases of precipitation summary nitrogen fallouts are 1,4 times higher in comparison with sulfur fallouts. But the content of sulfur decreases near 3 time in comparison with middle last century. From time to time increased acid precipitation fallout at all background stations in European part of Russia.

*Keywords:* chemical precipitation, background level, acid, stations of GAW WMO.

Tab. 4. Fig. 7. Ref. 10.

УДК 551.051.051

**Condition and prospects of radiophysical researches of an atmosphere and surface.** Shchukin G. G., Stepanenko V. D., Obratsov S. P., Karavaev D. M., Zhukov V. Y., Rybakov Y. V. Proceeding of MGO. 2009. V. 560. P. 143—167.

The review of radiophysical researches of the atmosphere executed in Voeikov Main Geophysical Observatory is given for last 10 years directed on development of remote sensing techniques of atmosphere and surface, such as radiometric method of profiles of atmospheric temperature and moisture determination. Design of the meteorological Doppler radar equipped by the microwave-radiometer is discussed. The comparative analysis of informations, derived from different satellite radiometers is executed. Techniques of definition of a surface temperature on according to radiometer AVHRR NOAA are presented.

Some results of experimental microwaves-radiometric measurements of integrated water vapor and cloud liquid are presented at various meteorological conditions, also during the dangerous phenomena connected with clouds. The error of the microwave-radiometric of measurements, accepts the satisfactory consent of the microwave-radiometric of data and the aerologic information are investigated by results of comparative experiments (international experiment CLIWA-NET, etc.).

Perspective directions of the researches connected with development of methods of the supershort-term weather forecast, weather modification experiments, estimations of a danger of aircraft icing are certain.

*Keywords:* radiative transfer equation, weighting functions, surface temperature, integrated water vapor, cloud liquid, statistical inversion method, microwave-radiometer, passive-active remote sensing, Doppler radar, aircraft icing.

Tab. 4. Fig. 6. Ref. 18.

УДК 551.509

**Some aspects of convective cloud and precipitation investigation.** Sinkevich A. A., Dovgaljuk Yu. A., Stepanenko V. D., Veremey N. E., Volkov N. N., Kurov A. B., Pivovarova L. V. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 168—188.

The main results of investigations of convective clouds physics and artificial modifications performed by MGO during the last ten years are presented.

Traditional investigations were developed: numerical simulation of convective cloud development during natural development and artificial modification, laboratory modeling of water phase transformations in clouds, investigations of pure water and salt solution drops freezing, equipment improvement.

Simultaneously new directions were developed: new glaze-ice and rime deposition instrument was constructed, fulleroid nano-particles effect on water drops freezing was investigated, methodic of using “Meteosat” satellite data for obtaining convective cloud characteristics was developed. Investigation of corona discharge effect on phase and microstructure water transformations in clouds was continued.

*Keywords:* cloud physics department, theoretical investigations, experimental investigations numerical simulation, laboratory experiments, artificial modifications, water phase transformations, glaze-ice and rime deposition instrument, fulleroid nano-particles, “Meteosat” satellite data, corona discharge.

Tab. 3. Fig. 5. Ref. 26.

УДК 551.509.6+551.594

**Active influences on cloud systems with the purpose of regulating precipitation and lightning activity.** Galperin S. M., Kozlov V. N., Stepanenko V. D., Shchukin G. G. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 189—212.

The results of using of methods and technical means for active modification of clouds with the purpose of precipitation prevention to provide favorable weather conditions during public events (protection of megacities) are presented. The analysis of long-standing experimental works in extinguishing forest fires by forest patrol aviation in various subjects of the Russian Federation with the use of sliver iodine and hygroscopic agents is performed. The outcome of such influences on the electricity status of clouds that results in currency conductive channel from a cloud to the ground is summarized. The possibilities of using of new technical means and methods for active modification management and control for cloud systems with the purpose of regulating precipitation and thunder-and-lightning activity are discussed.

*Keywords:* active modification of clouds, protection of megacities, extinguishing forest fires, electricity status of clouds.

Tab. 4. Fig. 2. Ref. 19.

УДК 551.594

**Investigation of the electrical processes in atmosphere and pelengation of thunderstorms.** Morozov V. N., Popov I. B., Snegurov A. V., Snegurov V. S., Sokolenko L. G., Schvarts Ya. M. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 213—242.

Review of investigations made by department of atmospheric electricity of the Voeikov Main Geophysical Observatory during last ten years and their future development are considered.

*Keywords:* atmospheric electricity, pelengation of thunderclouds.

Tab. 4. Fig. 4. Ref. 52.

УДК 551.576

**On the possibilities and features of radar rain intensity estimation by radio wave attenuation.** Stepanenko V. D., Emeljanova V. N., Dovgaljuk Yu. A. Proceeding of MGO. 2009. V. 560. P. 243—254.

The paper considers the basic physics, possibilities and features of estimating the rain intensity by radio wave attenuation using the meteoradar installed on the USA-Japan satellite TRMM. To increase the accuracy of rain intensity values adequate to natural conditions, the corresponding calculation method is suggested.

*Keywords:* rain, rain intensity, satellite TRMM, weather radar, radiowave attenuation.

Tabl. 2. Fig. 1. Ref. 10.

УДК 551.510.534

**Total ozone calculation for automated measurements by blue and cloudy sky zenith.** Solomatnikova A. A. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 255—267.

Total ozone calculation by measurements from blue and cloudy zenith methodology for ultra-violet ozone spectrometer (UVOS) are presented. The automatic application of correction for cloudy method for UV spectral distribution output of measurements are proposed. The part of the UV spectrum outside ozone absorption band is proposed to use for estimation of cloudy effect. The estimation is extrapolated to ozone absorption band.

*Keywords:* total ozone automated measurements, ultra-violet ozone spectrometer, correction for clouds, measurements by cloudy sky zenith.

Fig. 5. Ref. 12.

УДК 551.5

**An analysis of glaze-ice and rime deposition probe.** Zimenkov P. S. Proceedings of MGO. 2009. V. 560. P. 268—276.

The structure organization and functioning principles of device passive type are considered. Precision of measurements of basic properties glaze-ice and rime deposition is analysed.

*Keywords:* glaze-ice and rime deposition probe, measuring of water layer, measuring of glace layer, measuring of surface temperature.

Tab. 2. Fig. 3. Ref. 5.

## **Требования к оформлению рукописей, представленных для публикации**

К публикации в сборниках Труды ГГО принимаются результаты оригинальных исследований и сообщения по разделам: физика атмосферы, прикладная метеорология, дистанционное зондирование и активные воздействия, загрязнение атмосферы, климатология.

В комплект рукописи должны входить: основной текст; аннотации на русском и английском языках; электронная версия статьи; акт экспертизы; сопроводительное письмо, подписанное руководителем организации или учреждения, где работает автор; сведения об авторе (авторах) с указанием фамилии, имени, отчества, служебного телефона, электронного адреса, названия и почтового адреса учреждения, в котором была выполнена работа.

На первой странице рукописи в левом верхнем углу должен быть указан индекс по универсальной десятичной классификации (УДК), затем посередине страницы - название работы, инициалы и фамилии авторов, название организации, ее адрес, электронный адрес автора. Аннотации на русском и английском языках объемом не более десяти строк каждая с указанием ключевых слов (не более пяти слов или словосочетаний) и числа таблиц, рисунков и библиографических ссылок представляются на отдельном листе.

Рукопись должна быть набрана шрифтом Times New Roman размером 12 и напечатана через двойной интервал на одной стороне листа А4 с полями: нижнее, верхнее и левое 25 мм, правое 10 мм.

В списке литературы приводятся в алфавитном порядке сначала источники на русском языке, затем иностранная литература. Фамилия и инициалы автора (авторов) выделяются курсивом. Библиографические ссылки по тексту должны иметь следующий вид: (Иванов и др., 2005) *или* в работе Иванова и др. (2005). При наличии ссылок на несколько работ одного автора, опубликованных в одном году, рядом с годом издания указывается буква русского алфавита, показывающая порядок следования данного издания в списке литературы, например (Иванов, 2005а).

При оформлении списка литературы следует указывать: *для журнальных статей* фамилии и инициалы авторов, год, название статьи, название журнала, номер тома, номер выпуска, страницы; *для книг* фамилии и инициалы авторов, год, полное название книги, место издания (город), издательство, общее число страниц; *для авторефератов диссертаций* фамилию и инициалы автора, год, полное название, степень, специальность, место защиты, страницы; *для депонированных статей* фамилии и инициалы авторов, дату депонирования, название депонированной статьи, регистрационный номер; *для авторских свидетельств* фамилии и инициалы авторов, год, название а.с. и его номер, номер бюллетеня изобретений.

Редакция сохраняет за собой право вносить необходимые редакционные исправления, дополнения и сокращения.

Плата с авторов, в том числе аспирантов, за публикацию рукописей не взимается.

Консультации по вопросу публикации можно получить по e-mail: [makhotk@main.mgo.rssi.ru](mailto:makhotk@main.mgo.rssi.ru)

*Индекс 18617  
по каталогу Роспечати  
«Газеты. Журналы»*