

Федеральная служба  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А.И. Воейкова

Выпуск

**580**

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

Санкт-Петербург  
2016

---

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

*Редакционная коллегия*

Д-р физ.-мат. наук В. М. Катцов, д-р физ.-мат. наук Е. Л. Генихович,  
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 техн. наук А. А. Синькевич,  
канд. физ.-мат. наук С. С. Чичерин,  
канд. геогр. наук Е. Л. Махоткина (секретарь редколлегии)

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

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

Рекомендуется аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

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

Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory

*Editorial board*

Dr. V. M. Kattsov, Dr. E. L. Genihovich, Dr. A. S. Zaitsev, Dr. I. L. Karol,  
Dr. N. V. Kobysheva, Dr. V. P. Meleshko, Dr. A. V. Mescherskaya,  
Dr. A. A. Sinkevich, Dr. S. S. 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.

© Федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Главная геофизическая обсер-  
ватория им. А.И. Воейкова»,  
2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>И. М. Школьник, Г. Б. Пигольцина, С. В. Ефимов</i> Оценка возможного влияния изменений климата на агроклиматические условия произрастания хлопчатника и яровой пшеницы в Средней Азии. ....	7
<i>Е. Л. Генихович, И. Г. Грачева, Д. Ю. Румянцев, Яковлева Е. А.</i> Модель распространения атмосферных примесей типа «источник—рецептор» для оценки по климатическим данным антропогенной нагрузки на окружающую среду в мезо- и региональном масштабе. ....	33
<i>Е. Л. Генихович, И. Г. Грачева, А. Д. Зив, Д. Ю. Румянцев.</i> Разработка мезомасштабной региональной химической транспортной модели ГГО (ХТМ_ГГО). ....	54
<i>М. А. Васильева, Н. В. Жохова, А. А. Палей, Ю. В. Писанко, А. Е. Солодина, Л. И. Толпыгин, К. М. Филипченко.</i> Теоретические исследования динамики аэрозольных частиц под действием неоднородного электрического поля и оценка ее влияния на процессы рассеивания тумана. ....	82
<i>М. А. Васильева, С. Н. Дубцов, Н. В. Жохова, А. А. Палей, Ю. В. Писанко, Л. И. Толпыгин.</i> Оценка уровня концентрации аэрозольных частиц у автомобильной дороги и ЛЭП в сравнении с фоновыми показателями субмикронных частиц естественной атмосферы. ....	99
<i>В. В. Стадник, И. Н. Шанина.</i> Оценка естественной освещенности земной поверхности по актинометрическим данным. ....	110
<i>Ю. П. Михайловский.</i> О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации. ....	125

<i>Д. В. Дроздов, Ю. В. Рыбаков, О. А. Герасимов</i> СВЧ радиометрический комплекс дистанционного зондирования интегральных характеристик влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. ....	138
<i>Д. С. Ефременко, О. С. Сероухова.</i> Исследование влияния дискретности измерений на значения статистических характеристик временных рядов метеорологических величин. ....	153
<i>И. Н. Русин, Ю. А. Довгалюк, А. Л. Казанин.</i> Оценка ресурсов влаги, доступных при активных воздействиях на конвективные облака с использованием гигроскопического реагента. ....	165
<i>Р. В. Горбунов, Т. Ю. Горбунова, П. С. Калиновский, Н. К. Кононова, О. А. Миронюк.</i> Роль циркуляции атмосферы в изменении температуры воздуха на территории Крымского полуострова в XX—начале XXI века. ....	175
<i>А. А. Шаранова, И. В. Кужевская.</i> Разномасштабная цикличность индексов экстремальности климата на территории Алтайского региона. ....	199



## CONTENTS

<i>I. M. Shkolnik, G. B. Pigoltsina, S. V. Efimov</i> Evaluation of possible implications of climate change for agroclimatic conditions of cotton and spring-wheat vegetation. .....	7
<i>E. Genikhovich, I. Gracheva, D. Rumyantsev, E. Yakovleva.</i> A source—receptor meso- to regional scale model for estimation of the anthropogenic environmental loading using climatic information. ....	33
<i>E. Genikhovich, I. Gracheva, A. Ziv, D. Rumyantsev.</i> Development at MGO of a meso- to regional scale chemical transport model CTM_MGO. ....	54
<i>M. A. Vasilyeva, N. V. Zhokhova, A. A. Paley, Yu. V. Pisanko, A. E. Solodina, L. I. Tolpygin, K. M. Filipchenko.</i> Theoretical studies of the dynamics of aerosol particles under the influence of an uniform electric field, and assessment of its impact on the processes of the fog dissipation. ....	82
<i>M. A. Vasilieva, S. N. Dubtsov, N. V. Zhokhova, A. A. Paley, Yu. V. Pisanko, L. I. Tolpygin.</i> Assessing the level of concentration of particulate matter from road and power lines in comparison with background rates of submicron particles of natural atmosphere. ....	99
<i>V. V. Stadnik, I. N. Shanina.</i> Estimation of the natural illumination of the Earth's surface using actinometric data. ....	110
<i>Yu. P. Mikhaylovsky.</i> About verification of numerical models of convective clouds based on results of plane researches of electrization. ....	125
<i>D. V. Drozdov, Yu. V. Rybakov, O. A. Gerasimov</i> Microwave radiometric complex for total atmospheric water vapour and cloud liquid remote sounding. ....	138

<i>D. S. Efremenko, O. S. Serouhova.</i> Study of the influence on the value discontinuous measurements statistical characteristics of time series meteorological variables. ....	153
<i>I. N. Rusin, Yu. A. Dovgaluk, A. L. Kazanin.</i> Evaluation of Water Resources Available for Active Modifications of Convective Clouds by Means of Hygroscopical Reagent. ....	165
<i>R. V. Gorbunov, T. Y. Gorbunova, P. S. Kalinovskii, N. K. Kononova, O. A. Mironyuk.</i> Role of atmospheric circulation in air temperature changes on the Crimean peninsula in the XX century — beginning of XXI century. ....	175
<i>A. A. Sharapova, I. V. Kuzhevskaya.</i> Multi-scale recurrence of indexes of extremeness of climate in the territory of the Altai region. ....	199

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОИЗРАСТАНИЯ ХЛОПЧАТНИКА И ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В СРЕДНЕЙ АЗИИ**

*И. М. Школьник, Г. Б. Пигольцина, С. В. Ефимов*

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

Поступила в редакцию 1.02.2016

### **Введение**

Проблема оценки последствий развивающегося глобального потепления климата для сельскохозяйственного производства, как известно, носит региональный характер. Это обстоятельство требует проведения оценок влияния ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство и его адаптации к возможным отрицательным последствиям глобального потепления в рамках отдельных стран и регионов. Особенно актуальны такие исследования для аридных территорий Средней Азии, характеризующихся высоким теплоэнергетическим потенциалом и острым дефицитом влаги. Ведущее место в сельском хозяйстве среднеазиатских республик занимает производство хлопка и пшеницы. В этой связи анализ влияния изменений климата на агроклиматические условия произрастания этих культур имеет большое практическое значение.

В работах (Глазырина, 2012; Глазырина и Юлдашев, 2014) приводятся результаты исследований влияния ожидаемых изменений климата, обусловленных антропогенным воздействием, на агроэкосистемы Средней Азии. Для оценки последствий изменения климата были использованы результаты расчетов изменений глобального климата по семи специально выбранным моделям

МГЭИК с учетом двух сценариев эмиссии парниковых газов предыдущего поколения (IPCC, 2007). Изменение урожайности в указанных исследованиях оценивалось для конкретных выбранных участков (пунктов). Аналогичный подход к оценке воздействий глобальных климатических изменений на экономику региона в контексте анализа адаптационных стратегий, основанный на расчетах по пяти моделям МГЭИК, приведен в работе (Mirzabaev, 2013).

Здесь необходимо отметить следующее. Глобальные модели МГЭИК включают описание климатообразующих процессов в самом широком диапазоне масштабов в рамках замкнутой физической системы по аналогии с тем, как это происходит в реальной климатической системе Земли. Однако использование таких моделей в оценках изменений регионального климата и их последствий для сельского хозяйства часто оказывается затруднительным по причине большой пространственной сглаженности модельного климата, занижения его естественной изменчивости и недооценки опасных погодных явлений (IPCC, 2013). Проблема сглаженности обусловлена недостаточным разрешением глобальных моделей и, как следствие, ограниченным учетом влияния региональных особенностей на расчет мезомасштабной атмосферной циркуляции и характеристик приземного климата. Есть и другие особенности, ограничивающие широкое применение глобальных систем в исследованиях регионального климата. Например, эти модели используют одинаковый подход к описанию физических процессов одновременно во всех регионах Земли. Для реалистичного описания климатического режима конкретного региона (например, Средней Азии), представляющего интерес для импактных исследований, требуется специальная адаптация используемого в глобальном масштабе обобщенного описания взаимодействия пограничного слоя атмосферы с подстилающей поверхностью, детализация свойств почв, гидрологических процессов на суше и регионального термического режима.

Альтернативным источником детализированной информации о региональном климате и его изменениях служат специально разрабатываемые региональные климатические модели, основанные

на тех же физических законах и методах вычислительной математики, что и глобальные модели, но имеющие более высокое пространственное разрешение (Laprise, 2008; Rummukainen, 2010; Christensen et al., 2010). Разрешение таких моделей, лежащее в диапазоне 10—50 км, позволяет учитывать влияние на эволюцию климата мезомасштабных факторов, начиная с реалистичной орографии, небольших внутриконтинентальных водоемов, изменчивых характеристик растительности и свойств подстилающей поверхности. Как отмечено выше, перечисленные региональные особенности, взаимодействующие с глобальной циркуляцией атмосферы и играющие важную роль в формировании регионального баланса тепла и влаги, представлены на сетках глобальных моделей со слишком большим пространственным осреднением. Региональные модели используются в комплексе с другими моделями, выходящая информация которых предназначена для использования непосредственно в оценках воздействий изменений климата на региональную инфраструктуру и экосистемы.

В настоящей статье представлены результаты количественной оценки изменений агроклиматических условий произрастания различных сортов хлопчатника и яровой пшеницы к середине XXI века на территории Средней Азии, полученные на основе прогноза будущего климата этого региона по региональной климатической модели ГГО. Статья состоит из введения, описания постановки экспериментов, краткой климатической характеристики региона Средней Азии, оценок влияния возможных изменений климата региона на условия произрастания хлопчатника и яровой пшеницы при условии реализации одного из сценариев радиационного воздействия МГЭИК и заключения.

## **2. Региональная модель климата ГГО и постановка экспериментов**

Для расчета будущих изменений климата в Средней Азии используется система вероятностного прогнозирования климата ГГО. Составные элементы системы — глобальная и региональная

атмосферные климатические модели (разрешение соответственно 220 и 25 км), разработанные в ГГО (Мелешко и др., 2014; Shkolnik and Efimov, 2013). Обе модели имеют одинаковое вертикальное разрешение сетки (25 сигма-слоев разной толщины) и одни и те же параметризации физических процессов в атмосфере и активном слое почвы. Ключевой элемент в системе — региональная модель, разрешение которой позволяет получить высоколокализованные данные о климате и его изменениях для использования в качестве входной информации во многих импактных исследованиях для Средней Азии. Такие исследования могут включать оценки потенциальной урожайности, планирование строительства инфраструктурных объектов, оценку водных ресурсов и др. Здесь необходимо отметить, что водные ресурсы — важнейший социально-экономический драйвер региона, который, как ожидается, может сильно (и неравномерно) измениться по регионам Средней Азии в будущем в соответствии с существующими прогнозами изменений климата. Изменения водных ресурсов на фоне роста глобальной температуры воздуха скажутся на эффективности функционирования аграрного сектора экономики региона и, в первую очередь, на продуктивности хлопководства и зерноводства.

Региональная модель использует на боковых границах области расчетов температуру воздуха, ветер, влажность во всей толще атмосферы и атмосферное давление на подстилающей поверхности, рассчитанные по глобальной модели для каждого 6-часового интервала. Область расчетов включает  $97 \times 181$  точек горизонтальной сетки, охватывающих большую часть Средней Азии. Будущие изменения климата были рассчитаны для сценария RCP8.5 МГЭИК с использованием ансамбля моделей из трех членов. Эксперименты включали различные начальные условия в атмосфере и активном слое почвы для двух десятилетних окон 1990—1999 (базовый климат) и 2050—2059 (будущий климат). Таким образом, для каждого из окон модельные расчеты включают в общей сложности  $10 \times 3 = 30$  лет. В ходе расчетов использовались заданные изменения температуры поверхности океанов (ТПО) и концентрации морского льда (МЛ). Соответствующие распределения ТПО/МЛ получены в экспериментах

по моделированию изменений климата по трем наиболее успешным глобальным моделям CMIP5 (<http://pcmdi.llnl.gov/esgf-web-fe/>). Были выбраны следующие три модели с относительно небольшими ошибками в описании пространственно-временной изменчивости ТПО/МЛ: (1) ACCESS1-0 (Австралия), (2) CESM1-CAM5 (США) и (3) MPI-ESM-MR (Германия). Использование различных вариантов эволюции ТПО/МЛ в расчетах изменений климата региона Средней Азии по системе глобальной и региональной моделей позволяет учесть неопределенности прогнозов климата, возникающие на фоне не только межгодовой, но и естественной многолетней изменчивости, обусловленной эволюцией океанской компоненты глобальной климатической системы.

### **3. Краткая климатическая характеристика региона Средней Азии**

Средняя Азия как естественный географический район расположена в самом центре Евразии и включает в себя южную половину республики Казахстан и республики: Кыргызстан, Узбекистан, Туркменистан, Таджикистан.

Эта территория представляет собой обширную бессточную очень сухую область замкнутого Арало-Каспийского бассейна. Большое разнообразие ландшафтов и климатов данного района обуславливается не только большими размерами территории Средней Азии (около 1500 км с севера на юг и 2500 км с запада на восток), но и наличием обширных горных систем, относящихся к высочайшим поднятиям в мире. Определенное значение имеет и влияние водных бассейнов, прежде всего Каспийского моря.

Рассматриваемая территория располагается в двух зональных типах климатов: умеренных широт и субтропическом. По показателю теплообеспеченности периода вегетации ряд авторов (Бабушкин, 1960; Шашко, 1985; Изменчивость, 1995; и др.) относит большую часть Средней Азии к субтропической зоне, северная граница которой проходит по 43—44° с. ш. от побережья Каспийского моря на западе до хребта Каратау на востоке. Дальнейшие исследования

особенностей климатов аридной зоны Азии (Береснева, 2006) позволили более четко и обоснованно установить границу между двумя поясами.

Общей чертой климатических и ландшафтных зон Средней Азии являются высокие летние температуры и сухость климата. Эти континентальные особенности климата определяются географическим положением района. Значительная удаленность от основного источника влаги — Атлантического океана, очень высокие летние температуры и длительный период бездождья, вызываемого режимом атмосферной циркуляции, являются причиной возникновения здесь обширных пустынь. На равнинной территории Средней Азии годовое количество осадков колеблется от 70—75 до 300—400 мм.

Резко выраженная континентальность климата определяет большие колебания температуры, как в течение года, так и в суточном ходе. Средние годовые амплитуды температуры составляют 38—40 °С на севере и 28—30 °С на крайнем юге рассматриваемой территории. Резкое уменьшение годовой амплитуды температуры к югу от 45° с. ш. обусловлено более интенсивным притоком солнечной радиации в зимние месяцы и значительным смягчением зимнего режима температуры. Наибольшие суточные амплитуды температуры отмечаются в конце лета (август—сентябрь), когда они даже по средним многолетним данным составляют 12—13 °С на севере и 18—20 °С в южных районах. В отдельные годы и дни амплитуды температуры бывают значительно больше. Во все сезоны года при вторжениях холодных воздушных масс наблюдаются большие скорости ветра. С холодными вторжениями связаны также частые заморозки.

Климатический режим северной и южной половины территории Средней Азии существенно различается. Для северной половины, расположенной в сфере влияния зимнего сибирского антициклона, характерна суровая и долгая зима с устойчивыми морозами и продолжительным залеганием снежного покрова. Средняя температура января изменяется с севера на юг от –16 °С до –8 °С. Южная половина характеризуется мягкими зимами с неустойчивым снежным покровом и частыми переходами от морозов к



положительным значениям температуры воздуха. Средняя температура января изменяется здесь от  $-8^{\circ}\text{C}$  в северной части до  $+4^{\circ}\text{C}$  на юге. На температурный режим зимы значительное влияние оказывает Каспийское море, в прибрежной зоне которого температура воздуха на  $5-7^{\circ}\text{C}$  выше, чем в прилегающей пустыне.

Различны также условия теплого периода. В северной половине территории Средней Азии лето значительно короче, менее жаркое с относительно равномерным выпадением осадков. Однако, несмотря на то, что максимум осадков приходится здесь на летние месяцы, эти районы нередко подвержены длительным и интенсивным засухам. По средним многолетним данным здесь бывает около 60 дней с атмосферной засухой, а в отдельные годы число дней с засухой колеблется в диапазоне от 20 до 120. Средняя температура июля изменяется от  $20^{\circ}\text{C}$  на севере до  $27^{\circ}\text{C}$  на юге.

В южной половине Средней Азии температура июля увеличивается с севера на юг от  $27^{\circ}\text{C}$  до  $32^{\circ}\text{C}$ . Наиболее интенсивным увлажнением характеризуется зимне-весенний период, когда выпадает около 70—90 % годового количества осадков, при этом максимум их приходится на весну (март—апрель). Особенно острым дефицитом осадков отличается период с июня по октябрь. Проходящие изредка ливни не имеют существенного практического значения. На общем фоне характерной для этой территории большой засушливости хорошим увлажнением выделяются горные районы. На наветренных склонах гор выпадает большое количество осадков, годовая сумма которых местами превышает 1500—2000 мм.

#### **4. Влияние изменений климата на агроклиматические условия произрастания хлопчатника в Средней Азии**

##### **4.1. Современные агроклиматические условия произрастания хлопчатника**

Наличие среди пустынь Средней Азии высочайших горных массивов, которые являются активными аккумуляторами влаги, питающей обширную сеть стекающих с гор рек, создает благоприятные условия для высокопродуктивного поливного

земледелия. Обилие тепла и света при большой длительности вегетационного периода позволяет культивировать здесь такое теплолюбивое южное растение, как хлопчатник.

Агроклиматические ресурсы территории обычно оцениваются с помощью агроклиматических показателей, определяющих условия тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода (Пигольцина, 2005, 2007; и др.). Поскольку хлопчатник — культура поливная, то при достаточном орошении ведущим признаком для ее возделывания является термический режим, поэтому при оценке агроклиматических ресурсов рассмотрим только термические ресурсы. Оценка запасов воды для поливов находится за рамками данного исследования.

Нижний температурный предел развития хлопчатника (биологический ноль) составляет  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому термические ресурсы вегетационного периода хлопчатника в районах его возделывания характеризуются суммами активных и эффективных температур воздуха за период между датами устойчивого перехода температуры воздуха весной и осенью через  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Этот период в литературе называется периодом активной вегетации сельскохозяйственных культур. Суммы активных температур — это суммы средних суточных температур за указанный период. Эффективная температура — это разность между средней суточной температурой и биологическим нулем данной культуры, который, как указано выше, составляет для хлопчатника  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Важной термической характеристикой при оценке агроклиматических условий возделывания хлопчатника является безморозный период. Поздние весенние заморозки (минус  $0,5\text{—}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) вызывают гибель появившихся всходов хлопчатника, что приводит к изреженности посевов и влечет за собой пересевы на больших площадях. Осенью губительными заморозками являются заморозки интенсивностью минус  $3\text{—}4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при которых коробочки перестают раскрываться.

Для оценки современных термических условий периода вегетации хлопчатника на территории Средней Азии использовались данные реанализа ERA-Interim (Dee et al., 2011) по температуре воздуха, согласованные с данными наблюдений на метеостанциях за

тридцатилетний период 1979—2009 гг. (базовый период по отношению к прогнозируемому периоду 2050—2059 гг., см. разделы 4.2 и 5.2). По этим данным за указанный период были рассчитаны следующие агроклиматические показатели: суммы активных и эффективных температур за период с температурой воздуха выше 10 °С; даты перехода температуры воздуха через 10 °С и продолжительность соответствующего периода; продолжительность безморозного периода.

За базовый период суммы активных температур на территории Средней Азии увеличиваются в среднем от 3000 °С на широте 50° с. ш. до 5600 °С на крайнем юге (36° с. ш.). Пространственное распределение сумм активных температур представлено на рис. 1а. Суммы эффективных температур изменяются аналогичным образом от 1500 °С до 3000 °С (рис. 2а).

Исключение составляет район к северу от озера Балхаш (южная часть Казахского мелкосопочника), где наблюдается уменьшение продолжительности данного периода до 120 дней. Следует отметить, что этот район не входит в ареал возделывания хлопчатника, что будет показано ниже при определении границ возделывания разных сортов хлопчатника.

Пространственное распределение продолжительности безморозного периода более сложное, поскольку безморозный период существенно зависит от условий подстилающей поверхности. В целом на рассматриваемой территории безморозный период увеличивается с севера на юг от 130—135 до 225—230 дней. Продолжительность безморозного периода, также как и периода выше 10 °С, уменьшается в районе Казахского мелкосопочника и составляет здесь всего 105 дней. Увеличение безморозного периода происходит на побережьях морей. Особенно значительно увеличивается безморозный период в прибрежных районах Каспийского моря, где он в южной части достигает 270 дней.

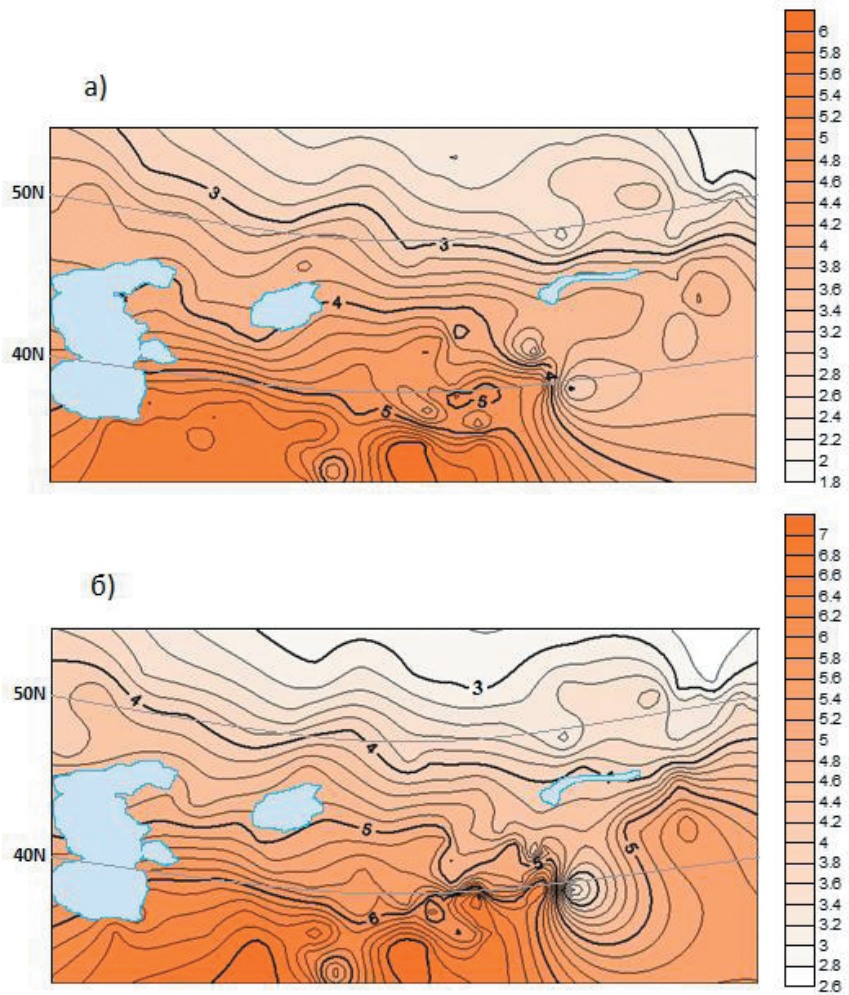


Рис. 1. Суммы активных температур воздуха (тыс. °С) за период с температурой выше 10 °С в периоды 1979—2009 гг. (а) и 2050—2059 гг. (б).

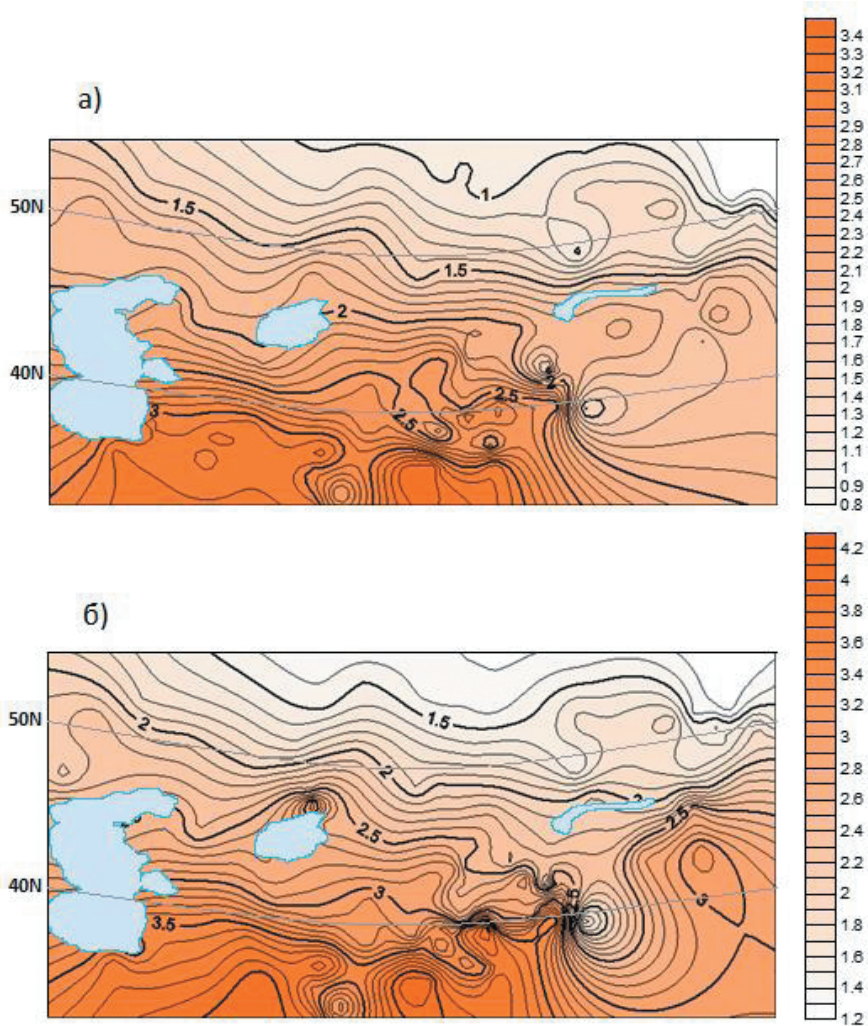


Рис. 2. Суммы эффективных температур воздуха (тыс. °С) за период с температурой выше 10 °С в периоды 1979—2009 гг. (а) и 2050—2059 гг. (б).

Продолжительность периода с температурой воздуха выше 10 °С в основном увеличивается с севера на юг от 160 до 250 дней.

Сравнение длительности безморозного периода и периода с температурой воздуха выше 10 °С (вегетационного) показывает, что на большей части территории безморозный период короче вегетационного, что говорит об опасности повреждения хлопчатника заморозками.

#### **4.2. Прогноз изменения агроклиматических условий произрастания хлопчатника на середину XXI века**

Для оценки влияния глобального потепления на условия произрастания хлопчатника были выполнены расчеты агроклиматических показателей за период 2050—2059 гг. на основе результатов расчетов по региональной модели.

Суммы активных температур к середине будущего периода (к 2055 году) могут возрасти примерно на 1000 °С на соответственных широтах, т. е. на широте 50° с. ш. сумма температур составит в среднем 4000 °С, увеличиваясь до 6600—6800 °С на крайнем юге (рис. 16). Таким образом, изолинии сумм активных температур сдвинутся к северу вследствие глобального потепления примерно на 5° широты по сравнению с базовым периодом. Аналогичным образом изменится пространственное распределение сумм эффективных температур, которые возрастут соответственно на 500 °С, и сдвиг по широте также составит около 5 °С (рис. 26).

Для количественной оценки пространственно-временной изменчивости сумм температур были рассчитаны их изменения к 2055 г. по отношению к 1995 г. Наибольшие изменения сумм активных температур ожидаются в районе Аральского моря, Казахского мелкосопочника и в предгорных районах на юго-востоке. В этих районах суммы активных температур возрастут на 30 % и более (рис. 3). Следует напомнить, что значения, полученные экстраполяцией в горных районах, не принимаются во внимание.

Пространственное распределение изменений сумм эффективных температур в основном повторяет распределение изменений сумм активных температур, но величина изменений эффективных температур на 5—10 % больше, чем активных температур (рис. 4).

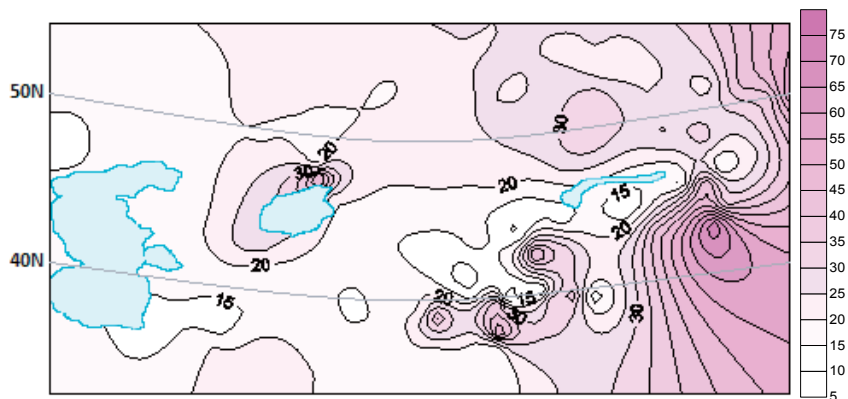


Рис. 3. Изменение (%) сумм активных температур выше 10 °С к 2055 г. по отношению к 1995 г.

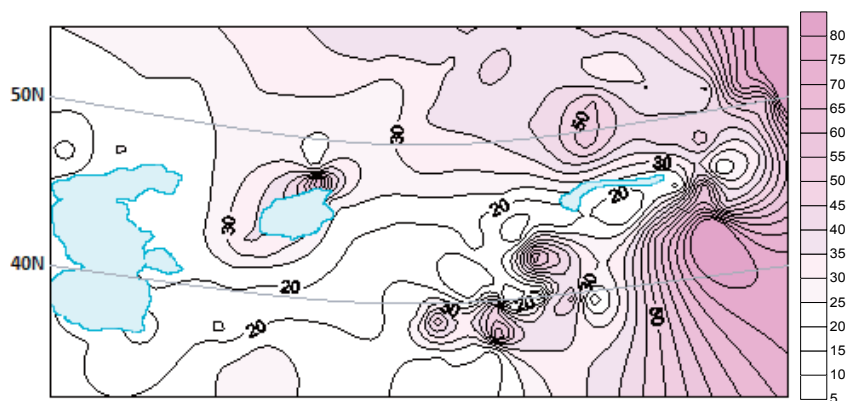


Рис. 4. Изменение (%) сумм эффективных температур выше 10 °С к 2055 г. по отношению к 1995 г.

Большое значение для оценки перспектив развития хлопководства имеют результаты расчетов изменений продолжительности периодов с температурой воздуха выше  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и безморозного. Оба периода на всей территории Средней Азии к середине столетия увеличатся в среднем от 10—15 дней в северных районах до 30—35 дней в южных районах (рис. 5, 6).

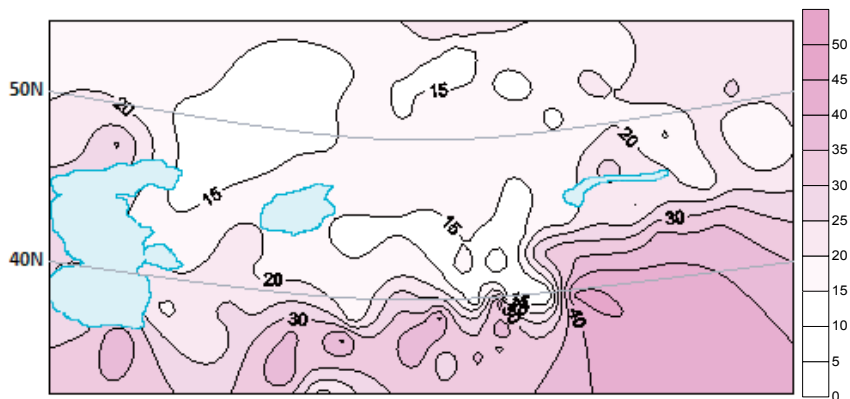


Рис. 5. Изменение (дни) продолжительности периода с температурой воздуха выше  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  к 2055 г. по отношению к 1995 г.

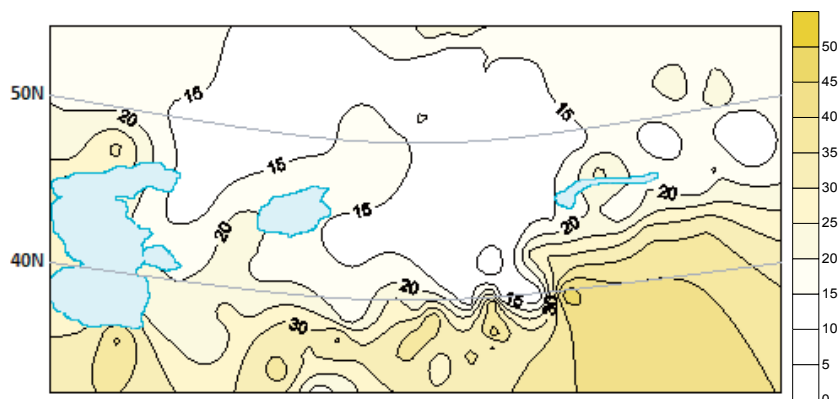


Рис. 6. Изменение (дни) продолжительности безморозного периода к 2055 г. по отношению к 1995 г.



Однако районы, где увеличение периодов составляет менее 15 дней, для безморозного периода охватывают бóльшую территорию, чем для периода с температурой воздуха выше 10 °С.

Увеличение продолжительности периода с температурой воздуха выше 10 °С и, соответственно, увеличение сумм температур за этот период дает возможность смещения северной границы ареала возделывания хлопчатника в более северные широты. Одновременно увеличение продолжительности безморозного периода уменьшает риск повреждения хлопчатника губительными заморозками.

Требования различных по скороспелости сортов хлопчатника к термическим условиям неодинаковые. По длительности вегетационного периода (от всходов до созревания коробочек) различают скороспелые (100—110 дней), среднеспелые (115—120 дней), среднепоздние (130—135 дней) и позднеспелые (150—170 дней) группы сортов хлопчатника. К позднеспелым относятся и тонковолокнистые (очень поздние) сорта.

Для произрастания различных сортов требуются определенные суммы эффективных температур (табл. 1). Используя данные табл. 1 и пространственное распределение сумм эффективных температур за базовый и будущий периоды (рис. 2), можно определить границы возделывания конкретных сортов хлопчатника, как современные, так и к середине столетия.

*Таблица 1*

**Температурные показатели созревания различных сортов хлопчатника**

Сорта хлопчатника	Суммы эффективных температур (°С)
скороспелые	1720—1730
среднеспелые	1795—1805
среднепоздние	1875—1885
позднеспелые	1970—2100

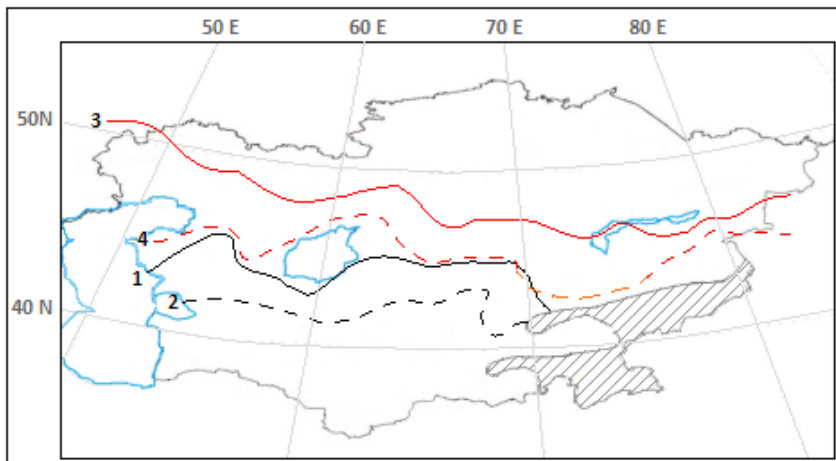


Рис. 7. Обеспеченность термическими ресурсами хлопчатника:

- 1 и 3 — обеспеченность термическими ресурсами скороспелых сортов хлопчатника, равная 99 %, соответственно в периоды 1979—2009 гг. и 2050—2059 гг.;
- 2 и 4 — обеспеченность термическими ресурсами очень поздних (тонковолокнистых) сортов хлопчатника, равная 99 %, соответственно в периоды 1979—2009 гг. и 2050—2059 гг.

*Условные обозначения: контуром обозначены границы республик Средней Азии, штриховкой — горы.*

Однако приведенные на рисунках суммы эффективных температур представляют собой средние многолетние суммы, которые наблюдаются примерно в половине всех лет наблюдений. При обеспеченности 99 % скороспелым сортам хлопчатника будет соответствовать средняя сумма эффективных температур 2070 °С, позднеспелым — 2450 °С. Оценка 99 % обеспеченности дана для крайних значений средних сумм эффективных температур — соответственно для 1720 и 2100 °С. На рис. 7 представлена карта, на которой нанесены четыре изолинии: 1 и 3 — это изолинии 99 % обеспеченности термическими ресурсами скороспелых сортов хлопчатника (2070 °С) соответственно за базовый и будущий периоды; изолинии 2 и 4 соответствуют такой же степени

обеспеченности очень поздних (тонковолокнистых) сортов хлопчатника (2450 °С) за базовый и будущий периоды.

Первая и третья изолинии, характеризующие ранние сорта 99 % обеспеченности, также соответствуют обеспеченности термическими ресурсами среднеспелых сортов хлопчатника, равной 90 %, и поздних сортов, равной 75 %.

Как видно из рисунка, при прогнозируемом изменении термического режима к середине столетия границы возделывания как ранних, так и поздних сортов хлопчатника существенно сдвинутся к северу, а хлопковая зона значительно увеличится.

## **5. Влияние изменений климата на агроклиматические условия произрастания яровой пшеницы в Средней Азии**

### **5.1. Современные агроклиматические условия произрастания яровой пшеницы**

Контрастность в смене засушливых и влажных периодов на общем фоне более или менее скудного увлажнения территории Средней Азии придает особую специфику сельскому хозяйству региона. При использовании гидротермических ресурсов осеннего, зимнего и весеннего времени года, когда выпадает основная часть годового количества осадков, можно в ряде районов развивать неполивное (богарное) земледелие и выращивать яровые зерновые культуры, в том числе яровую пшеницу.

Яровая пшеница не требовательна к теплу. Семена начинают прорастать при температуре 3—5 °С, жизнеспособные всходы появляются при температуре 5—7 °С. Оптимальная температура для роста и развития составляет 15—20 °С, температура выше 30—35 °С действует на растения угнетающе. Яровая пшеница достаточно морозоустойчива, всходы могут выдерживать заморозки до минус 9—10 °С.

Яровая пшеница как ранних, так и позднеспелых сортов, на всей территории равнинных и предгорных зон обеспечена теплом ежегодно. Сумма активных температур, необходимая для созревания

пшеницы, в зависимости от сортовых особенностей, составляет 1200—1700 °С, а период вегетации соответственно 85—120 дней.

Таким образом, при достаточном количестве тепла и крайней засушливости климата лимитирующим фактором для богарного земледелия являются условия увлажнения. Поэтому для характеристики агроклиматических ресурсов возделывания яровой пшеницы в данной работе выполнена количественная оценка условий тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода пшеницы.

Теплообеспеченность определяется суммами активных температур за периоды вегетации 85 и 120 дней. За дату начала периодов принята дата устойчивого перехода температуры воздуха через 7 °С. Прибавляя к этой дате 85 и 120 дней, получаем соответственно даты конца периодов.

Увлажнение территории зависит не только от количества выпадающих осадков, но и от особенностей термического режима. Чем выше температура, тем больше выпавших осадков испарится. Оценка влагообеспеченности может быть выполнена с помощью различных показателей увлажнения — коэффициентов увлажнения. В основе большинства коэффициентов лежит положение, согласно которому степень увлажнения территории находится в прямой зависимости от количества осадков и в обратной от возможного расхода влаги (испаряемости). Испаряемость рассчитывается по температуре, дефициту влажности воздуха или другим параметрам. Чаще всего характеристика территории по условиям влагообеспеченности производится по показателю увлажнения — гидротермическому коэффициенту Г. Т. Селянинова (ГТК), учитывающему количества тепла и влаги (Селянинов, 1928):

$$\text{ГТК} = \Sigma P / 0,1 \Sigma t,$$

где  $\Sigma P$  — сумма осадков за период вегетации культуры;  $\Sigma t$  — сумма температур за тот же период.

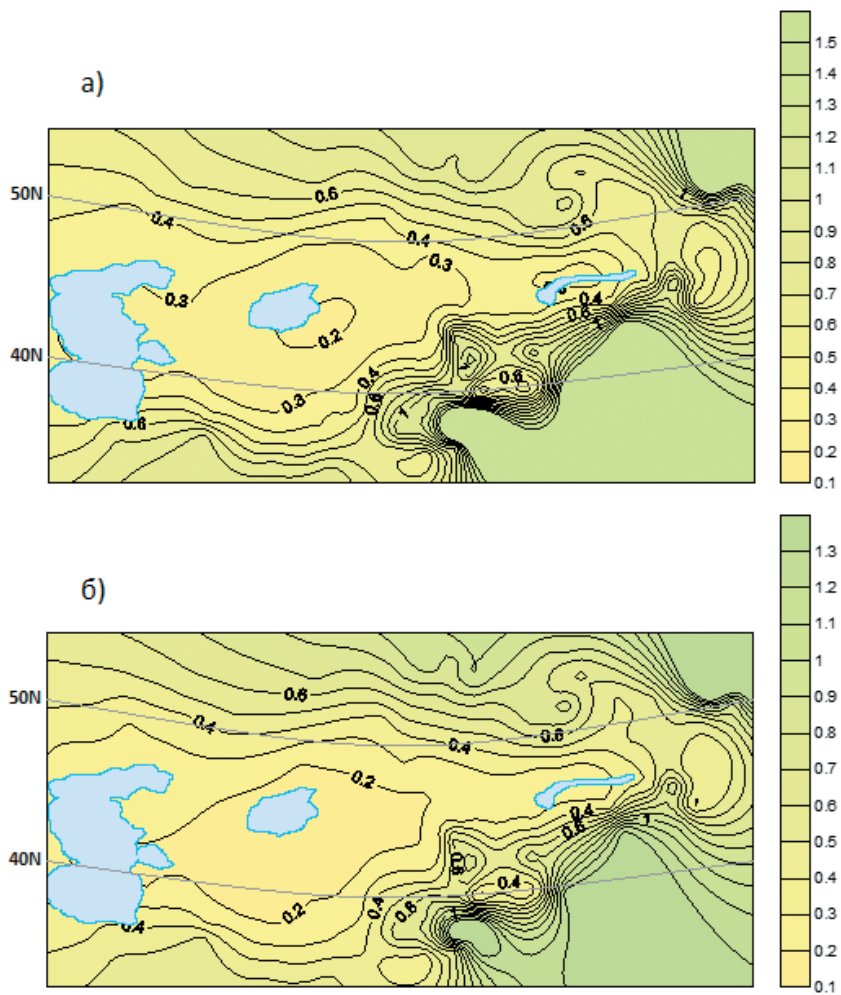


Рис. 8. Гидротермический коэффициент (ГТК)  
за периоды вегетации яровой пшеницы  
85 дней (а) и 120 дней (б) в период 1979—2009 гг.

Поскольку необходимо определить условия увлажнения не только для современного (базового) периода, но и на середину столетия (для будущего периода), для которого по региональной климатической модели прогноз дается по температуре и количеству осадков, то в данном случае целесообразно воспользоваться гидротермическим коэффициентом Г. Т. Селянинова (ГТК).

Гидротермический коэффициент, рассчитанный за реальный период вегетации яровых культур, учитывает количество тепла и влаги за этот конкретный период, поэтому он имеет решающее значение для величины урожая.

За период вегетации ранних сортов яровой пшеницы (85 дней) на большей части территории Средней Азии в настоящее время ГТК имеет очень низкие значения, равные 0,3 и менее (рис. 8а). Минимальные значения ГТК (0,2 и менее) охватывают сравнительно небольшой район к юго-востоку от Аральского моря.

К северу (в южной части Казахстана на широте 50° с. ш.) ГТК увеличивается до 0,4—0,5. Увеличение ГТК также происходит по направлению к горным хребтам. В предгорьях на юге Средней Азии ГТК возрастает до 0,8. Резкое увеличение ГТК происходит в предгорьях и горных долинах на юго-востоке, где ГТК достигает значений 1,0 и более.

За период вегетации поздних сортов яровой пшеницы (120 дней) ГТК на территории Средней Азии повсеместно уменьшается по сравнению с периодом 85 дней, и район со значением ГТК менее 0,2 занимает уже значительную часть территории (рис. 8б). Это происходит из-за того, что вегетационный период 120 дней захватывает летние месяцы (июнь—июль), когда количество осадков резко уменьшается, и начинается период засух.

Таким образом, ранние сорта яровой пшеницы находятся в более благоприятных условиях тепло- и влагообеспеченности, чем поздние сорта.

## **5.2. Прогноз изменения агроклиматических условий произрастания яровой пшеницы на середину XXI века**

Повышение температуры к середине столетия приведет к тому, что в ряде районов Средней Азии в течение всего года средние месячные температуры будут иметь значения выше  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в некоторых районах — выше  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), и соответственно даты устойчивого перехода через  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  в этих районах отсутствуют.

Следовательно, дату начала вегетационного периода яровой пшеницы в этих районах невозможно определить по дате устойчивого перехода температуры через  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , как это было выполнено для современного периода. Несмотря на то, что здесь в течение всей зимы температура выше  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и условия увлажнения благоприятны, очень рано производить сев нецелесообразно, так как значительная часть вегетационного периода яровой пшеницы будет иметь низкий фон температурного режима, тормозящий развитие растений, и за период вегетации не накопится необходимая для вызревания сумма активных температур. Поэтому при определении даты начала вегетационного периода ставились условия, чтобы температура после этой даты стабильно возрастала, а за период вегетации накапливалась достаточная сумма температур.

В районах, где по прогнозу средняя месячная температура воздуха весной ниже  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , за дату начала периода вегетации пшеницы принималась дата устойчивого перехода температуры через этот предел.

Определив таким образом даты начала периодов вегетации, были рассчитаны гидротермические коэффициенты (ГТК) за периоды вегетации 85 и 120 дней на середину текущего столетия (2050—2059 г.). По сравнению с современными условиями ГТК за период вегетации ранних сортов яровой пшеницы (85 дней) увеличится к 2055 году почти на всей территории Средней Азии (рис. 9). Увеличение ГТК происходит в основном с севера на юг. В северной половине территории Средней Азии ГТК увеличится на 10—20 %, в южной половине — до 40 %, а в отдельных районах даже до 50 %.

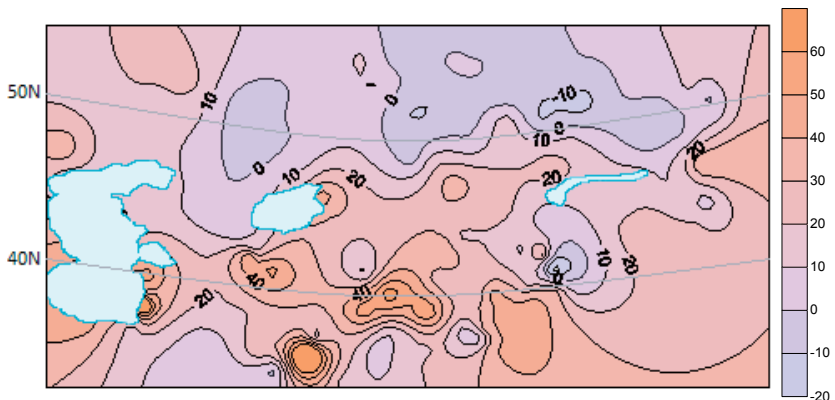


Рис. 9. Изменение ГТК (%) к 2055 г. по отношению к 1995 г. за период вегетации яровой пшеницы 85 дней.

За период вегетации поздних сортов яровой пшеницы (120 дней) ГТК также в основном увеличится (рис. 10).

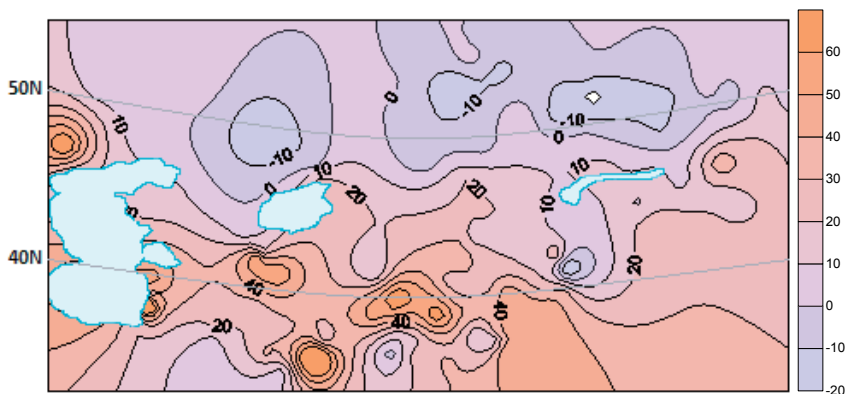


Рис. 10. Изменение ГТК (%) к 2055 г. по отношению к 1995 г. за период вегетации яровой пшеницы 120 дней.



Небольшое уменьшение величины ГТК ожидается на севере Казахстана, но эта территория, как отмечалось выше, выходит за пределы Средней Азии.

Пространственное распределение изменений ГТК за период вегетации 120 дней аналогично распределению за период 85 дней. Однако в районе к северо-западу от Аральского моря и на территории северного Казахстана уменьшение ГТК будет более интенсивным, чем за период 85 дней.

Увеличение значений гидротермического коэффициента показывает, что на территории Средней Азии агроклиматические условия выращивания яровой пшеницы на богарных землях к середине XXI века будут более благоприятными по сравнению с современным периодом.

Этот вывод, на первый взгляд, противоречит физическому смыслу последствий глобального потепления климата для аридных территорий. Под влиянием потепления суммы температур существенно возрастут, а количество осадков изменится сравнительно мало. Это приведет к увеличению засушливости климата и уменьшению ГТК в целом за теплый период года. Однако в связи с увеличением температуры даты начала периодов вегетации яровой пшеницы и, соответственно, весь период вегетации значительно сдвинутся на более ранние сроки, и период вегетации будет лучше обеспечен влагой, поскольку на этой территории максимальное количество осадков выпадает именно в зимне-весенний период.

## **Заключение**

Результаты расчетов изменений агроклиматических показателей к середине XXI века позволили сделать принципиальные выводы относительно основных последствий глобального потепления для агроклиматических условий произрастания ведущих сельскохозяйственных культур Средней Азии — хлопчатника и яровой пшеницы. Отметим следующие основные результаты исследования:

1) глобальное потепление, приводящее к значительному росту теплообеспеченности вегетационного периода, будет способствовать продвижению хлопковой зоны до 500 км к северу, что открывает широкую перспективу развития хлопководства в Средней Азии. Основная мера адаптации при расширении ареала возделывания хлопчатника будет заключаться в обеспечении оптимальных норм орошения;

2) глобальное потепление в целом позитивно повлияет на агроклиматический режим возделывания яровой пшеницы, выращиваемой на богарных землях. Повышение зимних и весенних температур воздуха приведет к сдвигу сроков сева яровых культур весной на более ранний срок, что позволит эффективно использовать ресурсы влаги зимне-весеннего периода, характеризующегося наиболее интенсивным увлажнением. Увеличение потенциала тепло- и влагообеспеченности периода вегетации яровой пшеницы даст возможность перераспределить территории зернопроизводства с целью увеличения части территорий для богарного земледелия. Это обстоятельство имеет первостепенное значение для развития сельского хозяйства в условиях крайне засушливого климата Средней Азии.

В дальнейшем целесообразно провести расширенное исследование по оценке будущих изменений агроклиматического потенциала Средней Азии на основе использования больших ансамблей (десятки членов) региональных климатических моделей высокого разрешения. Результаты расчетов таких моделей для Средней Азии в ближайшей перспективе должны стать доступными в рамках проекта CORDEX — крупной инициативы Всемирной Программы по Исследованию Климата по моделированию климата всех регионов Земли на основе суперансамбля региональных моделей (<http://www.cordex.org>). Использование ансамблей большего размера, по сравнению с относительно небольшим ансамблем на базе расчетов одной региональной модели, использованным в этом исследовании, должно стать отправной точкой для всесторонней оценки неопределенностей, сопровождающих оценки будущих изменений агроклиматических условий для культивирования таких культур, как хлопок и пшеница.

Это особенно важно, принимая во внимание большой разброс, который сейчас сопровождает современные мультимодельные оценки будущих изменений компонент водного баланса и других практически значимых характеристик климата в Средней Азии. Широкое использование ансамблей высокоразрешающих систем для выполнения вероятностных оценок воздействий климатических изменений на сельскохозяйственный сектор экономики региона должно привести, в конечном счете, к количественной оценке ожидаемых изменений биопродуктивности сельскохозяйственных культур и уточнению существующих стратегий возделывания земель в районах Средней Азии для их выращивания. Помимо этого, использование пространственно детализированной вероятностной информации о будущем климате откроет путь к оптимизации управления среднеазиатским агросектором в целом и выработке адаптационных мер в сельском хозяйстве к изменениям регионального климата на национальном уровне.

*Исследование выполнено при поддержке программы NASA Land Cover Land Use Change (проект NNX14AD88G).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бабушкин Л. Н.* (1960). Агроклиматическое районирование хлопковой зоны Средней Азии. — Л.: Гидрометеоиздат. 135 с.

*Береснева И. А.* (2006). Климаты аридной зоны Азии. — М.: Наука. 286 с.

*Глазырина М.* (2012). Адаптация к изменениям климата в Центральной Азии. [http://cac-program.org/files/15scm/glazirina\\_icarda\\_ru.pdf](http://cac-program.org/files/15scm/glazirina_icarda_ru.pdf).

*Глазырина М., Юлдашев Т.* (2014). Оценка влияния изменений климата на развитие и урожайность пшеницы. <http://fr.slideshare.net/ICARDA/climate-change-impact-assessment>.

Изменчивость климата Средней Азии (1995) / Под ред. Ф. А. Муминова, С. И. Иногамовой. — Ташкент: САНИГМИ. 215 с.

*Мелешко В. П., Матюгин В. А., Спорышев П. В., Павлова Т. В., Говоркова В. А., Школьник И. М., Байдин А. В.* (2014). Модель общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-03 T63L25) // Труды ГГО. Вып. 571. С. 5—87.

*Пигольцина Г. Б.* (2005). Агроклиматические ресурсы / Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. — СПб: Гидрометеиздат. С. 32—42, 198—200, 220—235, карты 2—10.

*Пигольцина Г. Б.* (2007). Агроклиматическое районирование / Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. — М.: ПКО Картография. С. 184.

*Селянинов Г. Т.* (1928). О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по с/х метеорологии. Вып. 20. С. 165—177.

*Шашко Д. И.* (1985). Агроклиматические ресурсы СССР. — Л.: Гидрометеиздат. 247 с.

*Christensen J. H., Kjellstrom E., Giorgi F., Lenderink G., Rummukainen M.* (2010). Weight assignment in regional climate models // *Climate Research*. P. 179—194. DOI: 10.3354/cr00916.

*Dee D. P. and 35 co-authors* (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* V. 137. P. 553—597. DOI: 10.1002/qj.828.

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, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller eds. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley eds. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 1535 p. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.

*Laprise R.* (2008). Regional climate modelling // *Journal of Computational Physics*. V. 227 (7). P. 3641—3666. DOI: 10.1016/j.jcp.2006.10.024/10.1016/j.jcp.2006.10.024.

*Mirzabaev A.* (2013). Climate Volatility and Change in Central Asia: Economic Impacts and Adaptation Inaugural / Dissertation zur Erlangung des Grades Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.) der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn. 167 p.

*Rummukainen M.* (2010). State-of-the-art with regional climate models // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. V. 1 (1). P. 82—96. DOI: 10.1002/wcc.8.

*Shkolnik I. M. and Efimov S. V.* (2013). Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: added value and uncertainties // *Environ. Res. Lett.* V. 8. 045007. DOI: 10.1088/1748-9326/8/4/045007.

УДК 551.510

## **МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ ТИПА «ИСТОЧНИК-РЕЦЕПТОР» ДЛЯ ОЦЕНКИ ПО КЛИМАТИЧЕСКИМ ДАННЫМ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В МЕЗО- И РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБЕ**

*Е. Л. Генихович, И. Г. Грачева, Д. Ю. Румянцев, Е. А. Яковлева*

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

Поступила в редакцию 22.01.2016  
Поступила после доработки 10.02.2016

### **1. Введение**

В течение ряда лет работы Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в области исследований и мониторинга загрязнения атмосферы были сфокусированы, в первую очередь, на проблематике, в той или иной степени связанной с решением практических задач управления качеством воздушного бассейна на основе оценки и, по возможности, минимизации негативных последствий загрязнения воздуха антропогенными выбросами от источников промышленности и транспорта. За основные критерии при этом принимались установленные санитарно-гигиенические нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест, соблюдение которых предписано действующим в России атмосфероохранным законодательством. Указанные нормативы соответствуют либо коротким (20—30 мин), либо длительным (сутки, сезон, год) временам осреднения. При этом было показано (Берлянд, 1975), что для одиночных точечных источников и компактно расположенных групп точечных источников наиболее жесткие ограничения на выброс в атмосферу вредных примесей возникают из

условия соблюдения тех нормативов ПДК, которые относятся к коротким временам осреднения. Соответственно, наибольшее внимание уделялось развитию методов расчета так называемых разовых, т. е. относящихся ко времени осреднения 20—30 мин, концентраций. При этом, в ГГО для пространственных масштабов от локального до «городского», что соответствует диапазону расстояний от источника до расчетной точки от нескольких метров до примерно ста километров, была разработана «иерархия» моделей, в которую входили как «фундаментальные» модели, основанные на численном решении уравнения атмосферной диффузии совместно с уравнениями гидротермодинамики пограничного слоя атмосферы, так и предназначенные для практического применения модели типа «источник—рецептор», которые далее упоминаются как «модели типа ИР» или как «ИР модели». Если известны характеристики источников выброса, то формально такие модели обеспечивают возможность расчета показателей загрязнения воздуха в произвольно расположенной расчетной точке (для наглядности рассчитанное при этом значение, например концентрации рассматриваемой атмосферной примеси, иногда интерпретируют как «результат измерения» этой концентрации «условным прибором», рецептором, т. е. датчиком, который находится в упомянутой расчетной точке). К классу моделей типа ИР относится, в частности, утвержденная на национальном уровне нормативная модель ОНД-86 (Берлянд и др., 1987; см. также Берлянд, 1975; Генихович, Берлянд, Оникул, 1999), формулы которой базируются на аналитической аппроксимации результатов табулирования выполненного в ГГО численного решения уравнения атмосферной диффузии. К аналогичному типу относится также разработанная в ГГО модель расчета долгопериодных средних концентраций (Генихович и др., 1998), практическая потребность в которой возникла в связи с произошедшим в нашей стране изменением структуры источников выброса и увеличением вклада в загрязнение воздушного бассейна городов источников, распределенных по территории (в первую очередь, автотранспорта).

Упомянутые модели ГГО широко используются в России при расчетах загрязнения воздуха и связанных с этим загрязнением

характеристик негативного воздействия на здоровье людей в локальном и городском масштабах, а также при определении для источников и предприятий допустимых выбросов, обеспечивающих соблюдение в этих масштабах установленных нормативов ПДК. Однако при дальнейшем увеличении пространственных масштабов основным фактором, лимитирующим выбросы антропогенных примесей в атмосферу, становится их негативное воздействие на окружающую среду. Для характеристики такого воздействия, в принципе, можно использовать концентрации атмосферных примесей, сопоставляя их с так называемыми «экологическими ПДК». Однако в нашей стране экологические ПДК установлены только для нескольких примесей и предназначены исключительно для ограничения негативного воздействия выбросов этих примесей на леса. В общем же случае в качестве показателя нагрузки на окружающую среду в мире обычно используется выпадение примесей на подстилающую поверхность. Этот показатель применяется, например, при оценке воздействия выбросов от источников различных, в основном европейских, стран на экологическую ситуацию в других странах, которая проводится в рамках выполнения принятой в 1979 г. Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния под эгидой Европейской Экономической Комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН). В данной статье дается описание разработанной в ГГО оригинальной модели ЭкоИР\_ГГО, предназначенной для расчета выпадения примеси на подстилающую поверхность. Модель ЭкоИР\_ГГО может оказаться эффективной при решении широкого круга атмосфероохранных задач, относящихся, например, к нормированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при условии ограничения нагрузки на окружающую среду, связанную с их выпадением на подстилающую поверхность, принятия решений, направленных на предотвращение закисления почв и эвтрофикации водоемов и др. В данной статье описание модели дано применительно к задаче оценки нагрузки на окружающую среду в условиях изменяющегося климата.

## 2. Постановка задачи

Для моделирования атмосферного переноса загрязняющих веществ в мезо-, региональном и глобальном масштабах в настоящее время наиболее универсальным инструментом являются так называемые химические транспортные модели (ХТМ), основанные на численном решении системы уравнений переноса и физико-химической трансформации атмосферных примесей совместно (в онлайн или офлайн моде) с системой уравнений гидротермодинамики атмосферы, применяемой для численного прогноза погоды. Разработанная авторами настоящей статьи модель такого типа ХТМ\_ГГО будет описана в отдельной публикации. В данной статье следует отметить только, что при использовании ХТМ обеспечивается возможность наиболее эффективного (с учетом ограничений, связанных с достигнутым к настоящему времени уровнем развития науки и вычислительной техники) описания переноса и рассеивания атмосферных примесей, их физической и химической трансформации, особенностей их формирования и выведения из атмосферы, в том числе при взаимодействии с подстилающей поверхностью, и др., что позволяет достаточно реалистично описывать протекающие в атмосфере процессы. Вместе с тем, существуют определенные ограничения на применимость ХТМ при решении ряда практически важных атмосфероохраных задач, особенно относящихся к случаю совокупности большого числа отдельных источников. Эти ограничения связаны как с принципиальной сложностью физико-математического моделирования процессов, протекающих в реальной атмосфере (в том числе, например, ее хаотических, турбулентных свойств), так и с довольно серьезными требованиями к техническим характеристикам используемых вычислительных платформ. Особо следует отметить, что при численной реализации положенных в основу ХТМ алгоритмов обычно используется метод сеток, применение которого подразумевает переход от локальных характеристик рассматриваемых примесей к их средним значениям по соответствующим ячейкам сетки (что, вообще говоря, оправдано только при малой пространственной изменчивости этих



характеристик внутри ячейки), а также «обобществление» выбросов от всех источников, попавших внутрь одной и той же ячейки. С учетом указанных ограничений в рамках международной программы ЕМЕП, обеспечивающей научное, методическое и информационное сопровождение Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, в 1983 г. в Международном институте прикладного системного анализа (IIASA, Laxenburg, Austria) была разработана модель RAINS типа «источник—рецептор», предназначенная для «экспресс-оценки» изменения нагрузки на окружающую среду в странах-участницах Конвенции при изменении выбросов подпадающих под ее действие атмосферных примесей.

Название модели представляет собой аббревиатуру от Regional Air Pollution Information and Simulation (информация и моделирование регионального загрязнения воздуха). Как явствует из ее описания (Amann et al., 2004; Amann, 2010; Kelly, 2006), она основана на систематизации многолетних результатов расчетов дальнего переноса химических загрязняющих веществ, проводившихся в международном Метеорологическом синтезирующем центре «Запад» (МСЦ-3) с помощью химической транспортной модели ХТМ-ЕМЕП-3 (Simpson et al., 2012; ЕМЕП/MSC-W Model, 2011). В результате разработчикам удалось для территории Европы и, отдельно, для части территории Азии (Индия, Китай, Пакистан) установить эмпирические (точнее, основанные на данных проведенных численных экспериментов с моделью ЕМЕП) связи типа «источник—рецептор», на основе которых можно, например, оценивать, какие значения показателей выпадения будут соответствовать тем или иным сценариям сокращения выбросов стран-участниц Конвенции. Дополнительные модули модели позволяют при этом определить необходимые для реализации таких сценариев затраты, их ожидаемый эффект и пр. На сайте IIASA отмечается что RAINS является первой компьютерной моделью, использование которой явилось ключевым элементом в заключении в 1994 г. международного соглашения тридцати пяти стран об ограничении выбросов диоксида серы в Европе (<http://www.iiasa.ac.at/web/home/about/achievements/scientificachievementsandpolicyimpact/cleaningeuropeair/The-RAINS->

Model.en.html). Модели RAINS и GAINS (модификация RAINS, предусматривающая дополнительный учет распространения в атмосфере парниковых газов) применяются также для оценки экологических и экономических последствий предполагаемых изменений климата (Klaassen et al., 2004; Anderson et al., 2006). В настоящее время модель растрожирована в 900 копиях и активно используется в пятидесяти странах в работе органов государственного управления, университетов, научных институтов, а также занимающихся проблемами охраны окружающей среды неправительственных организаций.

В России имеется опыт использования ХТМ-ЕМЕП-3 для оценки, например, переноса вредных примесей из-за рубежа на территорию регионов Европейской России (см., например, Морозова и др., 2001, Морозова и др., 2011). Разработанная в Москве в Международном метеорологическом синтезирующем центре (МСЦ-В) модель ХТМ-ЕМЕП-В применяется в оперативной практике ЕМЕП для оценки трансграничного переноса тяжелых металлов и устойчивых органических соединений (см. сайт <http://ru.msceast.org>). Для условий России предпринимались также попытки сформулировать соответствующую ИР-модель, которые, к сожалению, так и остались незавершенными.

При разработке первой очереди модели ЭкоИР\_ГГО, информация о которой представлена в данной статье, были сформулированы следующие исходные положения:

1) модель предназначена для оценки выпадения на подстилающую поверхность консервативных первичных загрязнителей (например, суммарной серы или азота, тяжелых металлов и пр.). Корректировка модели с целью учета воздействия вторичных загрязнителей будет проведена на следующем этапе разработки с использованием параметризаций, аналогичных применяемым в моделях RAINS и GAINS;

2) модель должна обеспечивать возможность непосредственного расчета долгопериодных средних выпадений примесей на подстилающую поверхность без воспроизведения внутрисуточной и внутригодовой динамики изменения рассматриваемых характеристик;

3) параметризация модели должна, по возможности, проводиться с использованием климатических характеристик режима метеоэлементов, определяющих перенос и выпадение атмосферных примесей в рассматриваемых пространственно-временных масштабах.

### **3. Общее описание модели**

Среди процессов, определяющих перенос атмосферных примесей от их источника до рецептора (точки наблюдений) наиболее существенными являются (см., например, Берлянд, 1975; Jacobson, 2005; Seinfeld, Pandis, 2006):

— направленный перенос этих примесей в поле средних скоростей воздушного потока;

— турбулентная диффузия примесей по вертикали и по горизонтали;

— сухое осаждение примесей за счет их взаимодействия с элементами постилающей поверхности;

— гравитационное осаждение (седиментация) таких примесей, которые переносятся в виде аэрозолей (взвешенных в воздухе частиц и капель) и обладают значимой скоростью гравитационного оседания по сравнению со скоростями вертикальных турбулентных пульсаций;

— влажное осаждение примесей, связанное с вымыванием осадками в результате (а) их захвата из загрязненного воздуха при выпадении капель дождя, снежинок или обводненных частиц града и др. или крупы, а также (б) выпадения загрязненных осадков из облака, в которое примеси были «захвачены» ранее в процессе его перемещения воздушным потоком, а затем перенесены вместе с облаком в район выпадения осадков;

— гомогенная и гетерогенная химическая и физико-химическая трансформация примесей в атмосфере.

В описываемой версии модели ЭкоИР\_ГГО учет процессов химической и физико-химической трансформации примесей не предусмотрен (соответствующую работу предполагается провести при ее дальнейшем развитии).

В качестве характеристики воздействия на окружающую среду в точке с координатами  $(x, y)$  примеси, выбрасываемой в атмосферу одиночным точечным источником, который размещен в точке  $(x_s, y_s, z_s)$ , где  $z_s$  — эффективная высота источника, а  $x_s, y_s$  — его координаты, используется плотность выпадения  $D(x, y; x_s, y_s, z_s)$ , т. е. поток примеси, выпавший на единицу площади. Для консервативных первичных примесей, таких, например, как суммарный выброс серы, азота или тех или иных тяжелых металлов, при расчете выпадения может использоваться принцип суперпозиции (аналогичный подход применяется и в модели RAINS). Отсюда вытекает, что, сформулировав модель для расчета  $D$  в случае одиночного точечного источника, мы обеспечиваем возможность расчета выпадения на подстилающую поверхность для случая произвольной совокупности источников выброса рассматриваемых примесей.

В моделях атмосферной диффузии, соответствующих сравнительно коротким (от нескольких минут до нескольких десятков минут) временам осреднения, поток примеси  $D$  представляется (см., например, Берлянд, 1975; Seinfeld, Pandis, 2006) в виде суммы (1):

$$D = D_g + D_d + D_w, \quad (1)$$

где слагаемые  $D_g$ ,  $D_d$  и  $D_w$  описывают эффекты гравитационного, сухого и влажного осаждения примесей, причем гравитационное осаждение (седиментация) необходимо учитывать только при описании распространения атмосферных аэрозолей. Следует отметить, что в ряде публикаций под сухим осаждением понимается сумма слагаемых  $D_g$  и  $D_d$  в (1), что, по-видимому, не является оправданным, поскольку физические механизмы, которыми обусловлены значения этих потоков, различаются кардинально; в частности, в уравнении атмосферной диффузии слагаемое, соответствующее гравитационному осаждению, присутствует непосредственно в самом этом уравнении, в то время как член, описывающий сухое осаждение, в данном уравнении не присутствует, а фигурирует только в граничном условии, задаваемом на

подстилающей поверхности. Можно предположить, что совместный учет эффектов гравитационного и сухого осаждения, вероятно, объясняется тем, что фигурирующие в (1) приземные потоки  $D_g$  и  $D_d$  выражаются сходным образом через значение приземной концентрации рассматриваемой примеси  $C$  в непосредственной близости от подстилающей поверхности, т. е. при  $z = 0$ :

$$D_g = w_g C |_{z=0}, \quad (2)$$

$$D_d = v_d C |_{z=0}, \quad (3)$$

где  $w_g$  и  $v_d$  — скорости гравитационного и сухого осаждения соответственно. Соотношение (2) относится к случаю распространения монодисперсного аэрозоля; в случае выброса полидисперсной примеси спектр ее размеров может разбиваться на несколько интервалов (градаций), внутри каждого из которых аэрозоль можно считать монодисперсным и для каждого из которых должен проводиться отдельный расчет с последующим суммированием полученных для каждой градации значений осаждения. Более эффективным, однако, представляется использование результатов интегрирования соотношений вида (2) по спектру размеров частиц (либо по связанному с ним спектру скоростей их оседания), как это было, например, сделано в работах Берлянд (1975) и Берлянд и др. (1987). Применительно к рассматриваемой задаче соответствующий подход обсуждается в разделе 4 данной статьи.

Очевидно, что сумма  $D_g$  и  $D_d$  описывается аналогичным выражением, причем в правой части в качестве коэффициента при  $C$  фигурирует сумма  $(v_d + w_g)$ . Отсюда понятно, что в рамках данной работы скорость сухого осаждения для аэрозолей может отличаться на  $w_g$  от соответствующего значения  $v_d$ , принимаемого в таких моделях, где сухое и гравитационное осаждение объединяются.

В пренебрежении парными среднегодовыми корреляциями приземной концентрации со скоростями, соответственно,

гравитационного или сухого осаждения можно принять, что формулы (2) и (3) относятся также к длительным временам осреднения (например, сезон или год). При этом, однако, переменные  $C$ ,  $w_g$  и  $v_d$  также должны соответствовать этим временам осреднения, а каждое слагаемое в (1) должно быть соотнесено с той частью общего периода осреднения, в течение которого играют существенную роль соответствующие физические эффекты. Так, например, слагаемое с  $D_w$  относится только к той части общего периода осреднения, когда имеет место выпадение осадков, что позволяет пренебречь в (1) вкладом двух других слагаемых в суммарное выпадение примеси. При этом из (1) вытекает следующее соотношение для среднегодового потока примеси на подстилающую поверхность:

$$\bar{D} = (1 - \chi_w)(\bar{D}_d + \bar{D}_g) + \chi_w \bar{D}_w, \quad (4)$$

где  $\chi_w$  — относительная (безразмерная) продолжительность осадков за рассматриваемый период осреднения, а черта сверху означает среднее по этому периоду. Суммарное выпадение на подстилающую поверхность может быть получено из (4) умножением на общую продолжительность периода осреднения. Для простоты в данной статье описывается вариант модели, соответствующий годовому осреднению.

#### 4. Используемые параметризации

**Среднегодовой поток примеси, обусловленный эффектами сухого осаждения**, определяется в модели как произведение суммарной среднегодовой приземной концентрации  $C$  на среднюю скорость сухого осаждения. В свою очередь, эта концентрация  $C$  рассчитывается, как суперпозиция (линейная комбинация) среднегодовых приземных концентраций  $C_i$ , обусловленных выбросами рассматриваемого загрязняющего вещества (ЗВ) от источника №  $i$ , где  $i = \overline{1, N}$  и  $N$  — общее количество включенных в расчет точечных источников (площадные и объемные источники

аппроксимируются в расчете как совокупность точечных). Расчет среднегодовой концентрации  $C_i$  при этом производится по формуле (5) (см. Генихович и др., 1998):

$$C_i(r, \varphi) = M_i \iint G(r, u, \lambda; S_i) p_1(u, \varphi) p_2(\lambda) du d\lambda. \quad (5)$$

Здесь  $C_i(r, \varphi)$  — концентрация ЗВ в точке с полярными координатами  $r$  и  $\varphi$ , где «азимут 0» соответствует направлению на север, а начало координат соответствует точке размещения источника,  $M_i$  и  $S_i$  — среднегодовая мощность и прочие технические параметры (например, высота, температура и др.), характеризующие выброс ЗВ от рассматриваемого источника,  $u$ ,  $\lambda$  и  $\varphi$  — метеорологические параметры, которыми задаются условия переноса примеси от источника на расчетную точку (соответственно, скорость ветра на верхней границе приземного слоя, параметр турбулентности, определение которого будет приведено ниже, а также направление «резльтирующего переноса», обратное направлению результирующего ветра, обеспечивающему поступление примеси от источника в расчетную точку). Кроме того, в (5) фигурируют функция  $G(r, u, \lambda; S_i)$ , которая получена в результате аналитической аппроксимации численного решения уравнения атмосферной диффузии и характеризует изменение осевых приземных концентраций ЗВ по мере удаления от источника, а также совместная плотность вероятностей  $p_1(u, \varphi)$  параметров  $u$  и  $\varphi$ , и плотность вероятностей  $p_2(\lambda)$  параметра  $\lambda$ . При этом безразмерный параметр  $\lambda$ , описывающий условия турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы, определяется как отношение коэффициента турбулентного обмена  $K_z$  на расположенном внутри приземного слоя уровне  $z$  над подстилающей поверхностью к произведению высоты  $z$  на соответствующую ей скорость ветра. Заметим, что при расчетах среднегодовых концентраций для расстояний до нескольких сот километров от источника выбросов эффективной является факторизация плотности вероятностей  $p_1(u, \varphi)$  в виде произведения

одномерных плотностей вероятностей  $p(\varphi)$  и  $p'(u)$ , что означает независимость таких случайных переменных, как скорость и направление ветра (см. соответствующие ссылки в Генихович и др., 1998).

При известных подынтегральных функциях для каждого из рассматриваемых источников интегралы вида (5) определяются численно на регулярной сетке расчетных точек. Затем определяются соответствующие потоки с использованием для среднегодовых выпадений соотношений вида (3), которые далее суммируются с целью вычисления результирующего значения потока примеси за счет сухого осаждения.

**Формулы для расчета потока ЗВ на подстилающую поверхность, обусловленного влажным осаждением,** основаны на модели вымывания примеси осадками из дымового факела, предложенной в статье Гениховича (1984). Как показано в этой статье, среднегодовое интегральное влажное выпадение в круг радиуса  $r$  выражается через среднее значение экспоненты  $\exp(-ki^n)$ , где  $i$  — интенсивность осадков,  $n$  — показатель степени, равный примерно 0,8, а коэффициент пропорциональности  $k$  включает зависимость от скорости ветра вида  $1/u$ . Заметим, что константа  $n$  введена при задании в уравнении атмосферной диффузии описывающего вымывание примеси члена  $-\alpha(i)c$ , где  $c$  — концентрация ЗВ, а  $\alpha(i)$  определяется по формуле (6):

$$\alpha(i) = \alpha_0 (i/i_0)^n, \quad (6)$$

причем  $\alpha_0$  — константа, характеризующая скорость вымывания и имеющая размерность «времени в минус первой степени», а  $i_0 = 1$  мм/час.

Для вычисления указанного среднего значения в статье Гениховича (1984) используется совместная плотность вероятностей интенсивности осадков и скорости ветра, а результирующее среднее находится в результате численного интегрирования. С учетом того, что вопрос определения по данным наблюдений указанной



совместной плотности вероятностей до настоящего времени проработан недостаточно, в рамках обсуждаемой в настоящей статье модели среднее значение указанной выше экспоненты определяется из приближенного аналитического выражения, полученного при замене интенсивностей осадков  $i$  на их среднее значение  $I$  и при аппроксимации повторяемостей скорости ветра гамма-распределением. Тогда результирующее выражение для потока  $D_{wi}$  влажного выпадения ЗВ от одиночного точечного источника может быть выражено через мощность выброса, ряд климатических параметров и отношение  $r/L_w$ , где  $L_w$  определено по формуле (7):

$$L_w = \frac{k\bar{u}}{\alpha_0} \left(\frac{I_0}{I}\right)^n. \tag{7}$$

Здесь  $k$  — константа, а  $\bar{u}$  — средняя скорость ветра. Полное влажное осаждение определяется путем суммирования вкладов от отдельных источников и умножения полученной суммы на  $\chi_w$ .

При заданной плотности распределения  $p_w$  аэрозольных частиц по их скоростям оседания  $w$  **расчет среднегодовой плотности потока  $dP_{iw}(w)$  гравитационного выпадения частиц**, соответствующих градации скоростей оседания от  $w$  до  $w + dw$ , может проводиться по согласованному с формулой (5) выражению (8):

$$dP_{iw}(r, \varphi) = M_i w p_w(w) dw \iint G(r, u, \lambda; S_i) \chi_w p_1(u, \varphi) p_2(\lambda) du d\lambda, \tag{8}$$

где через  $\chi_w$  обозначено отношение «концентраций»  $G$ , соответствующих рассматриваемому ненулевому значению  $w$ , к их значению при  $w = 0$  (естественно, что это отношение может зависеть также от всех указанных в (5) аргументов функции  $G$ ). Отсюда видно, что в общем случае для расчета гравитационного осаждения аэрозолей необходимо в каждой рассматриваемой расчетной точке вычислять тройные интегралы по  $u$ ,  $\lambda$  и  $w$ . При вычислении таких интегралов целесообразно переставить порядок интегрирования так, чтобы внутренним оказалось интегрирование по  $w$ . Тогда результирующая суммарная (по аэрозольным частицам всех рассматриваемых

размеров) среднегодовая плотность гравитационного осаждения может быть представлена в виде (9 а):

$$\overline{D_w} = M_i \iint G(r, u, \lambda; S_i) \overline{\chi_w} \rho_1(u, \varphi) \rho_2(\lambda) du d\lambda, \quad (9a)$$

где коэффициент выпадения полидисперсной примеси  $\overline{\chi_w}$  определяется из (9 б):

$$\overline{\chi_w} = \int_0^{\infty} \chi_w(w) \rho_w(w) dw. \quad (9б)$$

В общем случае коэффициент  $\overline{\chi_w}$  зависит от всех аргументов G, а также, при параметрическом задании распределения скоростей, от всех его параметров. Численное табулирование этого коэффициента представляет собой достаточно громоздкую задачу. Поэтому в данной работе мы ограничились наиболее простой аппроксимацией, в рамках которой для  $\overline{\chi_w}$  использовано аналитическое выражение, полученное в работе Гандина и Соловейчика (1958) (см. также монографию М. Е. Берлянда, 1975). Если при этом  $\rho_w(w)$  аппроксимируется гамма-распределением, то (9 б) сводится к вычислению однократного интеграла, который удастся легко затабулировать и зааппроксимировать. В случае использования более сложной функции  $\rho_w(w)$  она представляется в виде суперпозиции гамма-распределений, а затем выпадения рассчитываются для каждого из этих распределений отдельно и суммируются.

Приведенные формулы относятся к случаю распространения атмосферных примесей в пространственно-однородных условиях. Это, по сути, означает, что ими можно пользоваться для расчетов выпадения примесей на сравнительно ограниченных территориях с характерными размерами порядка нескольких сотен километров. Для больших пространственных масштабов формулы должны быть модифицированы таким образом, чтобы обеспечить возможность учета изменения режима метеоэлементов от расчетной точки к точке, а также обеднение факелов примеси за счет ее сухого осаждения.

Такая модификация включает следующие корректировки расчетной схемы:

1. При расчете влажного осаждения по формуле (7) отношение  $\Gamma/L_w$  заменяется на  $\int_0^r dr / L_w$ ;

2. Оценка выпадения примеси в расчетной точке производится с использованием результатов интерполяции климатических параметров и распределений в рассматриваемую расчетную точку. В качестве исходных при этом принимаются эмпирические значения параметров и распределений, полученные по данным инструментальных наблюдений на сети метеостанций, или же результаты обработки материалов модельных расчетов, включая данные климатического моделирования, реанализа и др.

## 5. Апробация модели

Разработанная модель была использована для оценки выпадения на поверхность Ладожского озера соединений серы и азота, поступающих в атмосферу от антропогенных источников Санкт-Петербурга и городов Ленинградской области. В расчетах выбросы принимались по данным 2013 г., причем источники Санкт-Петербурга задавались с учетом их распределения по территории города и по высотам, а валовые выбросы для каждого из городов Ленинградской области по каждой примеси аппроксимировались суммарно как один приземный одиночный точечный источник. Полученные расчетные поля среднегодовой плотности полного выпадения соединений серы и азота (в условных тоннах  $SO_2$  и  $NO_x$  на квадратный километр в год) показаны, соответственно, на левой и правой панели рис. 1. Из приведенных карт видно, что в загрязнении Ладоги за счет выброса вредных примесей в атмосферу доминирующим является вклад от источников Санкт-Петербурга (действительно, система изолиний на картах «центрирована» относительно Санкт-Петербурга, а влияние выбросов от остальных городов приводит только к сравнительно небольшим по амплитуде возмущениям этих изолиний).

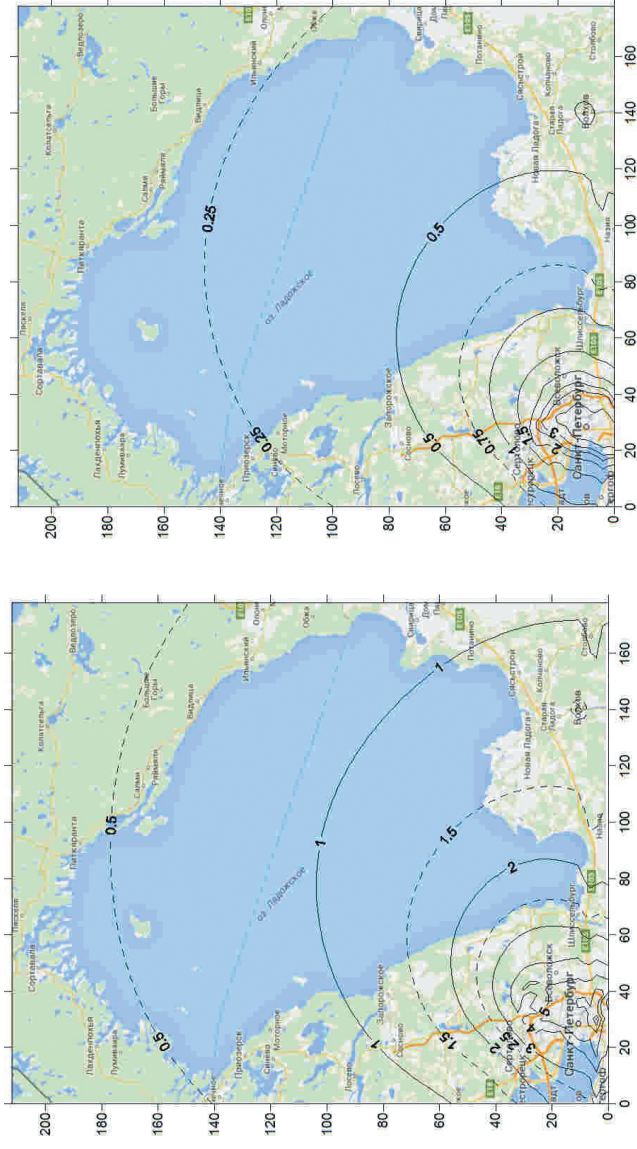


Рис. 1. Плотность выпадений (г/км<sup>2</sup>/год) соединений серы (левая панель) и азота (правая панель) на поверхность Ладожского озера.

К сожалению, систематический мониторинг ни полного, ни, отдельно, сухого осаждения загрязняющих веществ на подстилающую поверхность в России не проводится. В то же время, имеется эффективно работающая сеть станций мониторинга химического состава атмосферных осадков, данные наблюдений на которых позволяют оценить влажное осаждение ряда примесей. Полученные оценки регулярно публикуются в ежегодных обзорах состояния загрязнения окружающей среды, а также в специализированных обобщениях. В частности, в данной статье для валидации разработанной модели расчета влажного осаждения использованы материалы публикации (Свистов и др., 2014), в которой, в частности, даны значения плотности потока влажного осаждения для ст. Воейково, расположенной примерно в 30 км от южной оконечности Ладожского озера. К сожалению, в указанной публикации последние по времени данные приводятся за 2010 г., за который информация об источниках выбросов отсутствовала.

Для станции Воейково модельные расчеты дали значения плотностей влажного выпадения, которые в пересчете на S и N равны, соответственно, 1,4 и 0,2 т/(км<sup>2</sup>год), в то время, как измеренные величины составляли 0,4 и 0,3 т/(км<sup>2</sup>год). С учетом того, что межгодовая изменчивость рассматриваемых характеристик может достигать нескольких сотен процентов, и что достоверность данных о выбросах вызывает определенные сомнения, приведенные результаты не выглядят неприемлемыми. Следует добавить, что эта же модель была использована для оценки выпадения загрязняющих веществ, выбрасываемых от источников Байкальской природной территории, на поверхность озера Байкал. Указанная работа, проводившаяся совместно со специалистами Байкальского института природоведения, будет представлена в отдельной публикации. В рамках же настоящей статьи можно только отметить, что сопоставление полученных оценок влажного выпадения с данными мониторинга химического состава атмосферных осадков в районе оз. Байкал показало их удовлетворительное согласие. Так, например, для района размещения станции Хужир (о-в Ольхон) расчетная плотность выпадения серы

составила 0,03 т/(км<sup>2</sup>год), а по данным измерений за 2013 г. соответствующее значение оказалось равным 0,04 т/(км<sup>2</sup>год).

## **6. Заключение**

Представленные материалы свидетельствуют о том, что описанная в статье модель ЭкоИР\_ГГО имеет определенный потенциал для развития. Вместе с тем, уже в нынешнем виде предложенный подход может быть использован для решения ряда научных и практических задач. Значительная часть этих задач, по существу, аналогична задачам, которые могут быть решены при использовании модели RAINS. Поэтому в рамках настоящей статьи имеет смысл остановиться на тех задачах, решение которых с помощью RAINS может оказаться недостаточно эффективным.

Прежде всего, это относится к задачам оценки влияния возможных изменений климата на ожидаемый уровень нагрузки на окружающую среду, который связан с антропогенными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу. Понятно, что решать такие задачи можно только с использованием аппарата математического моделирования, причем первичным является выбор «климатического драйвера», т. е. модели, описывающей возможные изменения климата и используемой совместно с региональной моделью изменения климата, которая обеспечивает телескопизацию полученных полей (или ансамбля таких моделей). Понятно также, что при применении этих климатических моделей в работах по оценке влияния возможных изменений климата на характеристики антропогенного загрязнения воздуха выбросами от промышленных и прочих антропогенных источников к моделям предъявляются дополнительные требования по обеспечению реалистичного воспроизведения режима атмосферной турбулентности и «мезомасштабной части» спектров пульсаций скоростей и температур, которые определяют закономерности атмосферной диффузии, меандрирования факелов примеси и внутрисуточной изменчивости поля концентрации. Методические подходы к решению возникающих при этом проблем, к сожалению, до настоящего времени разработаны недостаточно, что ставит под сомнение

эффективность непосредственного использования климатических моделей в качестве драйвера для описывающих перенос и диффузию атмосферных примесей химических транспортных моделей (ХТМ).

Что же касается описанной в данной статье модели типа «источник-рецептор», которая позволяет оценивать воздействие на окружающую среду с использованием характеристик режима определяющих параметров, полученных на основе климатической обработки данных, то при ее применении для решения обсуждаемой задачи можно выделить три этапа. Первый из них связан с разработкой методологии построения по результатам климатических расчетов обобщенных характеристик климатического режима входных параметров, используемых в модели «источник—рецептор». Далее следует этап валидации этой методологии с использованием указанных характеристик, соответствующих фактическому положению, а также существующих данных мониторинга показателей нагрузки на окружающую среду. Наконец, на третьем этапе проводятся расчеты нагрузки на перспективу.

Наиболее сложной при этом оказывается проблема прогнозных оценок ожидаемых изменений характеристик антропогенных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ. Получение таких оценок представляется довольно сложным и не слишком надежным делом, так что реальные расчеты будут проводиться с использованием одной из следующих двух гипотез: (а) выбросы принимаются неизменными или (б) изменение выбросов предполагается пропорциональным глобальным изменениям выбросов в соответствии со сценарием, используемым при проведении климатических расчетов.

*Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00753 а. Авторы приносят благодарность к. г. н. Э. Г. Богдановой за помощь при подборе и анализе информации о климатических характеристиках атмосферных осадков.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Берлянд М. Е.* (1975). Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат. 428 с.

*Берлянд М. Е., Гасилина Н. К., Генихович Е. Л., Оникул Р. И., Глухарев В. А.* (1987). Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. — Л.: Гидрометеоиздат. 92 с.

*Гандин Л. С., Соловейчик Р. Э.* (1958). О распределении дыма из фабричных труб // Труды ГГО. Вып. 77. С. 84—94.

*Генихович Е. Л.* (1984). Оценка количества примеси, вымываемой осадками из дымового факела // Труды ГГО. Вып. 479. С. 30—38.

*Генихович Е. Л., Берлянд М. Е., Оникул Р. И.* (1999). Развитие теории атмосферной диффузии как основа для разработки атмосфероохранных мероприятий / В сб.: Современные исследования в Главной геофизической обсерватории / Под ред. М. Е. Берлянд, В. П. Мелешко. Т. 1. С. 99—126.

*Генихович Е. Л., Берлянд М. Е., Грачева И. Г., Елисеев В. С., Зив А. Д., Оникул Р. И., Филатова Е. Н., Хуришудян Л. Г., Чичерин С. С., Яковлева Е. А.* (1998). Оперативная модель расчета долгопериодных средних концентраций // Труды ГГО. Вып. 549. С. 11—13.

*Морозова И. А., Киселев В. Б., Шмидова Л. Б., Талалаев С. М., Каишева Л. В.* (2001). Межрегиональное атмосферное загрязнение территорий. Мурманская область / Под ред. В. Б. Миляева. — СПб: НИИ охраны атмосферного воздуха. 81 с.

*Морозова И. А., Игнатьева Ю. С., Волкова К. А., Зубов В. А.* (2011). Моделирование трансграничного загрязнения субъектов Северо-Западного федерального округа // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. Вып. 3. С. 20—28.

*Свистов П. Ф., Полищук А. И., Першина Н. А., Павлова М. Т.* (2014). Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2006—2010 гг. (обзор данных). — СПб: ФГБУ «ГГО». 67 с.

*Amann M.* (2010). The regional air pollution information and simulation (RAINS) model / In: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Integrated Global Models of Sustainable Development. V. III. <http://www.eolss.net/sample-chapters/c15/e1-47-15.pdf>.

*Amann M., Cofala J., Heyes C., Klimont Z., Mechler R., Posch M., Schöpp W.* (2004). The Regional Air Pollution Information and Simulation (RAINS) model. Documentation of the model approach prepared for the RAINS peer review 2004. [ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/2/.../2-2005-1133-EN-1-0.Pdf](http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/2/.../2-2005-1133-EN-1-0.Pdf). 156 p.

*Anderson D., Barker T., Foxon T., Pan H., Warren R., Winne S.* (2006). Linking air pollution with climate change. <http://www.tyndall.ac.uk/sites/default/files/tr53.pdf>.



EMEP/MSC-W Model (2011). The EMEP/MSC-W Model. User's Guide. [ftp://ftp.met.no/projects/emep/OpenSource/201108/userguide\\_062011.pdf](ftp://ftp.met.no/projects/emep/OpenSource/201108/userguide_062011.pdf).

*Jacobson M. Z.* (2005). *Fundamentals Atmospheric Modelling*. — Cambridge University Press. 813 p.

*Kelly J. A.* (2006). *An Overview of the RAINS Model*. Environmental Research Centre Report, EPA. [https://www.epa.ie/pubs/reports/research/air/EPA\\_overview\\_of\\_rains\\_model\\_ERC4.pdf](https://www.epa.ie/pubs/reports/research/air/EPA_overview_of_rains_model_ERC4.pdf).

*Klaassen G., Amann M., Berglund C., Cofala J., Hoglund-Isaksson L., Heyes C., Mechler R., Tohka A., Schöpp W., Winwarter W.* (2004). The Extension of the RAINS Model to Greenhouse Gases // Interim Report IR-04-015, IIASA. 136 p.

*Seinfeld J. H., Pandis S. N.* (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change*. — Wiley. 1190 p.

*Simpson D., Benedictow A., Berge H., Bergström R., Emberson L. D., Fagerli H., Flechard C. R., Hayman G. D., Gauss M., Jonson J. E., Jenkin M. E., Nyíri A., Richter C., Semeena V. S., Tsyro S., Tuovinen J.-P., Valdebenito A., Wind P.* (2012). The EMEP MSC-W chemical transport model — technical description // *Atmospheric Chemistry and Physics*. <http://www.atmos-chem-phys.net/12/7825/2012/acp-12-7825-2012.pdf>. Doi: 10.5194/acp-12-7825-2012.

## **РАЗРАБОТКА МЕЗОМАСШТАБНОЙ/РЕГИОНАЛЬНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ ГГО (ХТМ\_ГГО)**

*Е. Л. Генихович<sup>\*)</sup>, И. Г. Грачева, А. Д. Зив, Д. Ю. Румянцев*

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

<sup>\*)</sup> E-mail: ego@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 22.01.2016...

Поступила после доработки 10.02.2016

### **1. Введение**

Разработка и внедрение химических транспортных моделей (ХТМ) представляет собой один из наиболее бурно развивающихся разделов современной вычислительной метеорологии, физики и химии атмосферы. В нашей стране такие работы были начаты под руководством Г. И. Марчука в 1970-е годы в ВЦ Сибирского отделения АН и в Институте вычислительной математики АН (см. монографии Марчука, 1982 а, б; Пененко и Алояна, 1985; а также курс лекций Алояна, 2002). К сожалению, в последние несколько десятков лет развитию указанного направления в нашей стране не уделяется достаточного внимания. В то же время, за рубежом соответствующие работы ведутся чрезвычайно широким фронтом. Описание ряда ХТМ содержится в публикации Schlünzen, Sokhi (2008), подготовленной в рамках выполнения европейского проекта COST-728. Информацию о ХТМ можно найти также в работах Baklanov, Mahura, Sokhi (2011); Baklanov et al. (2013); Bessagnet et al. (2004); Grell, Baklanov (2011); Hu, Talat Odman (2008); Korsholm et al. (2008); Mircea et al. (2008); Sofiev, Galperin, Genikhovich (2008); Vogel et al. (2009) и др.

Достигнутый в мире прогресс в моделировании процессов переноса и физико-химической трансформации атмосферных примесей обусловлен целым рядом факторов, среди которых, в первую очередь, можно упомянуть интенсивное развитие таких наук

как физика и химия атмосферы, прогресс вычислительной математики, бурный рост производительности и мощности современных вычислительных платформ, а также успехи в создании и внедрении мезомасштабных, региональных и глобальных моделей численного прогноза погоды. Поскольку практическая потребность в ХТМ достаточно велика, их разработкой занимались и продолжают заниматься сильные исследовательские группы в метеослужбах ряда зарубежных стран, в том числе Германии, Франции, Финляндии, США, Канады и др. Ряд международных проектов, уже выполненных в последние годы или выполняемых в настоящее время, направлен на разработку методологии применения ХТМ как в оперативной практике гидрометслужб, так и при решении ряда других практических задач, в которых требуется оценка антропогенного и/или естественного воздействия атмосферных примесей на окружающую среду и здоровье людей. В данной связи представляется обоснованной разработка в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) оригинальной химической транспортной модели, тем более что специалисты ГГО имеют многолетний опыт работ в области физико-математического моделирования процессов переноса и физико-химической трансформации атмосферных примесей, а также численной реализации, внедрения и практического использования разработанных моделей. В данной статье приводится краткое описание некоторых результатов разработки и апробации полученной ХТМ, которая далее обозначается аббревиатурой ХТМ\_ГГО.

## **2. Физико-математическая постановка задачи и численная реализация модели**

В основу модели положено численное решение системы уравнений атмосферной диффузии, каждое из которых записано для концентрации одной из рассматриваемых примесей. Для сокращения и упрощения формул приводимые ниже уравнения будут выписаны только для концентрации одной из примесей. Также для упрощения записи предполагается, что уравнения записываются в декартовой

системе координат с осью z, направленной по вертикали, и компоненты скорости ветра удовлетворяют уравнению неразрывности, в котором пренебрегается зависимостью плотности от координат. Все эти, а также ряд других, не оговариваемых отдельно, упрощений, относятся только к способу представления информации в настоящей статье, поскольку в модели ХТМ\_ГГО они не реализованы. Так, например, в ХТМ\_ГГО предусмотрена возможность использования достаточно общих систем координат, в том числе сферических, сигма-координат (по вертикали) и др.

Исходное дифференциальное уравнение при этом имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u_i + w_g \delta_{i3}) \frac{\partial c}{\partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - \alpha c + S, \quad (1)$$

где c — концентрация;  $u_i$  и  $K_i$  — компоненты средней скорости ветра и коэффициента турбулентной диффузии вдоль декартовых координатных осей  $x_i$ ;  $w_g$  — скорость гравитационного оседания примеси (отлична от нуля в случае переноса аэрозолей);  $\delta_{i,j}$  — символ Кронекера, равный 1 при совпадении индексов и нулю при их несовпадении;  $\alpha$  — «коэффициент несохранения», отличный от нуля в случае переноса неконсервативной примеси и позволяющий учесть влияние радиоактивного распада, вымывания примесей осадками и др.; S — член, позволяющий учитывать влияние источников и стоков примесей, их химическую (в том числе, фотохимическую) трансформацию и пр. Выражение (1) записано с использованием правила Эйнштейна, в соответствии с которым предполагается суммирование по повторяющимся индексам от 1 до 3 (случай, когда такая суммация отсутствует, будут оговариваться отдельно).

Несохранение примеси за счет ее радиоактивного распада или вымывания с осадками описывается в (1) как реакция 1-го порядка. Остальные реакции 1-го и/или более высоких порядков учитываются в слагаемом S, характеризующем источники и стоки этой примеси. В частности, если известно, что в точке с координатами  $(x_1^s, x_2^s, x_3^s)$  находится точечный источник мощности M, то в S включается

слагаемое  $M\delta(x_1 - x_1^s)\delta(x_2 - x_2^s)\delta(x_3 - x_3^s)$ , где через  $\delta(s)$  обозначена дельта-функция Дирака (в сокращенной записи это выражение будет далее приводиться как  $M_s \delta(x_i - x_i^s)$ ). Поскольку любой распределенный источник можно аппроксимировать совокупностью точечных источников, т. е. представить в виде суммы членов вида  $M_s \delta(x_i - x_i^s)$ , включенных в правую часть (1), ХТМ\_ГГО фактически пригодна для того, чтобы описывать распространение примесей от любой совокупности естественных и антропогенных источников.

Для решения задачи в области интегрирования  $\Omega$  с границей  $\Gamma$ , которая включает, в частности, подстилающую поверхность  $\Gamma_0$ , необходимо также задавать краевые условия, которые будут выписаны в следующем виде:

$$c|_{t=0} = c^0(x_i) \text{ при } x_i \in \Omega; \quad (2a)$$

$$(K_3 \frac{\partial c}{\partial x_3} + (w_g - v_d)c)|_{x_i \in \Gamma_0} = 0; \quad (26)$$

$$c|_{(\Gamma/\Gamma_0)^+} = c_b. \quad (2b)$$

Здесь  $\Gamma/\Gamma_0$  — отличная от подстилающей поверхности часть границы области интегрирования, штрихом обозначена часть этой границы  $\Gamma/\Gamma_0$ , через которую воздушный поток втекает внутрь области интегрирования, и  $c_b$  — «фоновая» концентрация рассматриваемой примеси на этой части границы.

Для численного решения задачи использовано сочетание метода расщепления по физическим процессам и метода сеток (Марчук, 1982 а; Берлянд, 1975; Galperin et al., 2010). На дробных шагах, соответствующих турбулентной диффузии, турбулентные потоки аппроксимировались с использованием значений эффективных коэффициентов турбулентности, определенных согласно Берлянд (1975); Genikhovich, Sofiev, Gracheva (2007); Sofiev, Galperin,

Genikhovich (2008). При этом фигурирующие в (1) значения коэффициентов турбулентной диффузии восстанавливались по прогностическим полям скоростей ветра и температуры с использованием методологии, предложенной в работе (Генихович, Осипова, 1984) и получившей дальнейшее развитие в публикациях Groisman, Genikhovich (1997) и Sofiev et al. (2010). На дробных шагах, описывающих адвективный перенос примеси, уравнения аппроксимировались с использованием метода Galperin (1999); Galperin et al. (2010); Sofiev et al. (2015) (по нашему мнению, такой подход имеет явное преимущество перед более традиционным, связанным с использованием уже ставшей классической схемы Bott, 1993). Аппроксимация вертикальных переноса и диффузии, а также дельта-функций в правой части (1) построена на основе подхода, предложенного Берляндом (1975).

При моделировании загрязнения атмосферы на основе численного решения (1) необходимо на каждом временном шаге знать прогностические значения компонент скорости ветра и температуры, данные о полях давления и других метеопараметров в рассматриваемом регионе. Эти характеристики получаются в результате численного решения уравнений гидротермодинамики атмосферы, которое также может выполняться на каждом временном шаге совместно с решением (1) или же осуществляться предварительно (в последнем случае получаемые характеристики сохраняются в памяти компьютера и затем используются при численном интегрировании (1) для определения коэффициентов этого уравнения). В ХТМ\_ГГО реализован именно последний вариант. При этом ХТМ\_ГГО разрабатывалась таким образом, чтобы, в принципе, обеспечить возможность ее стыковки с различными метеодрайверами, т. е. моделями численного прогноза погоды, которые позволяют «генерировать» трехмерные нестационарные поля метеозаэlements, определяющих распространение атмосферных примесей. В частности, в начальной версии в качестве метеодрайвера использовалась модель MM5 (Grell, Dudhia, Stauffier, 1995), которая в настоящее время заменена на более широко распространенную в мире модель WRF-ARW (см, например, библиографию в Saide et al., 2011). В рамках

данной статьи описание используемых моделей численного прогноза представляется нецелесообразным. Следует только отметить, что «стандартные» метеорологические драйверы применяются нами для получения полей срочных значений определяющих атмосферный перенос примесей метеозлементов (компоненты средней скорости ветра, температуру воздуха, осадки и пр.). При этом коэффициент вымывания осадками растворимых примесей определяется с использованием подхода, изложенного в статье Гениховича (1984). Для расчета коэффициентов турбулентности ( $K_x$ ,  $K_y$ ) и  $K_z$  в модели использовались, соответственно, формула Смагоринского-Лилли (Smagorinsky, 1993) и формула, опубликованная в упомянутых выше работах (Генихович, Осипова, 1984; Groisman, Genikhovich, 1997; Sofiev et al., 2010). Фигурирующие в граничном условии на подстилающей поверхности скорости сухого осаждения определяются отдельно для каждой клетки расчетной сетки в зависимости от типа подстилающей поверхности соответствующей территории с использованием методологии, заимствованной (с некоторыми уточнениями) из европейской транспортно-фотохимической модели EMEP (Simpson et al., 2003, 2012).

Для описания трансформации атмосферных примесей в ХТМ\_ГГО использован физико-химический механизм CBM-IV (Gery, Whitten, Killus, 1986; Hogo, Gery, Dodge, 1998), в котором учитывается 81 реакция с участием 32 реагентов. Система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих результирующую химическую кинетику CBM-IV, была построена с использованием кинетического препроцессора KPP (Damian et al., 2002). На каждом временном шаге численное решение этой системы осуществлялось на одном из дробных шагов методом Розенброка с использованием программного кода на языке Фортран, приведенного Sandu (1997), Sandu, Sander (2006).

При отработке модели проводилось, в частности, сопоставление результатов расчетов с известными для случая постоянных коэффициентов (см. Берлянд, 1975) аналитическими решениями уравнения (1) для мгновенного и непрерывного источников легкой или тяжелой примесей. Примеры такого сопоставления приведены на

рис. 1—3. Все расчеты проведены при следующих значениях размерных параметров:  $dt = 400$  с;  $dx = dy = 500$  м;  $dz = 10$  м;  $k_x = k_y = 100$  м<sup>2</sup>/с;  $k_z = 10$  м<sup>2</sup>/с. Скорости ветра задавались постоянными по высоте:  $u = v = 1$  м/с;  $w = 0$ ;  $v_d = 0$ ; ось  $x$  была направлена вдоль приземного ветра. Высота источника ( $H$ ) принималась равной 100 м, а мощность  $10^8$  г/с.

На рис. 1 показаны результаты сравнения приземных концентраций для мгновенного источника легкой ( $w_g = 0$ ) примеси, рассчитанных по аналитической формуле (3) («жирные» кривые) для мгновенного источника и полученных численно с помощью ХТМ\_ГГО («тонкие» кривые). При оценке степени близости полученного численного решения задачи к аналитическому следует иметь в виду, что (3) является точным решением задачи (1) – (2) только в случае, когда член уравнения (1), описывающий диффузию вдоль  $x$ , пренебрежимо мал. Очевидно, что это условие выполняется тем точнее, чем больше время диффузии.

$$q(t, x, y, z) = \frac{M}{8(\pi t)^{3/2} \sqrt{k_x k_y k_z}} e^{-\frac{(x-ut)^2}{4K_x t} - \frac{y^2}{4K_y t}} \left[ e^{-\frac{(z-H)^2}{4k_z t}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{4k_z t}} \right] \quad (3)$$

Результаты аналогичного сравнения для источника легкой примеси, включенного в момент времени  $t = 0$ , приведены на рис. 2. При этом нестационарные решения, которые были получены для различных моментов времени, отсчитываемых от момента включения источника, сопоставлены со стационарным аналитическим решением (4):

$$q(x, y, z) = \frac{M}{4\pi x \sqrt{k_y k_z}} e^{-\frac{uy^2}{4k_y x}} \left[ e^{-\frac{u(z+H)^2}{4k_z x}} + e^{-\frac{u(z-H)^2}{4k_z x}} \right] \quad (4)$$



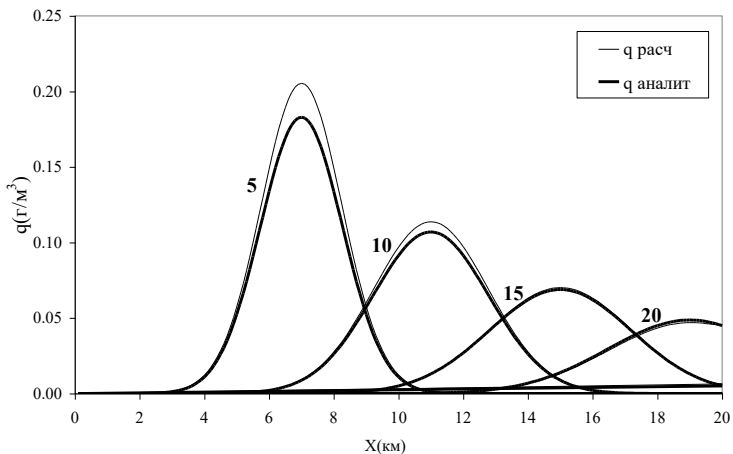


Рис. 1. Сравнение приземных концентраций легкой ( $w_g = 0$ ) примеси от мгновенного источника, рассчитанных по численной ХТМ и по формуле (3). Цифрами над кривыми обозначены номера шагов по времени.

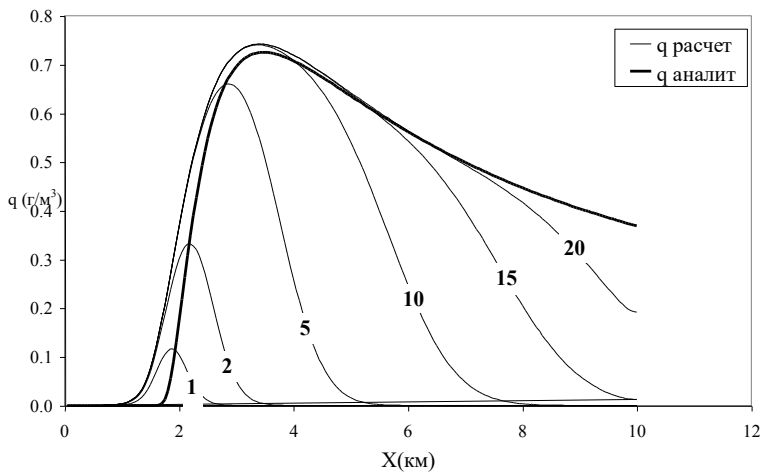


Рис. 2. Сравнение результатов расчета приземных концентраций легкой примеси от включенного в момент  $t = 0$  источника по численной ХТМ и по формуле (4). Цифрами над кривыми обозначены номера шагов по времени.

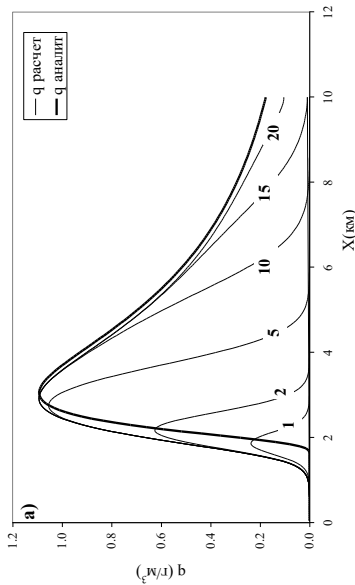
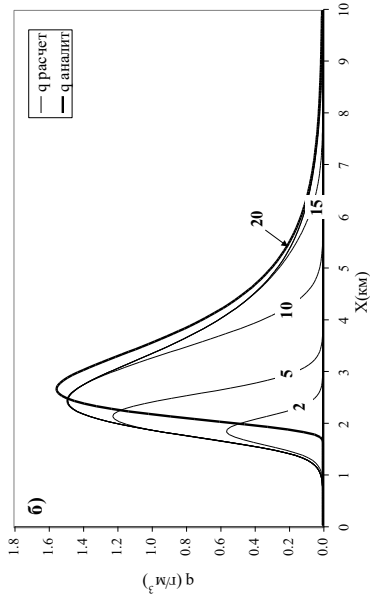


Рис. 3. Сравнение результатов расчета приземных концентраций тяжелой примеси от включенного в момент  $t = 0$  источника по численной ХТМ и по формуле (5).

Расчеты проведены при  $k_x = k_y = 100 \text{ м}^2/\text{с}$  и при а)  $Wg = -0,02 \text{ м/с}$ ; б)  $Wg = -0,05 \text{ м/с}$ .

Цифрами над кривыми обозначены номера шагов по времени.

Из рис. 1 видно, что с течением времени численное решение стационарирует, и что получаемое при этом стационарное решение «стремится» к решению (4).

Аналогично рис. 2, на рис. 3 для включенного в момент  $t = 0$  источника тяжелой примеси при различных скоростях гравитационного осаждения сопоставлены приземные концентрации, вычисленные с помощью ХТМ, и стационарное распределение приземной концентрации, полученное по аналитической формуле (5) из (Берлянд, 1975):

$$q_w|_{y=z=0} = \frac{2M}{\pi\sigma_1 u H^2} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} e^{-\sigma_0^2} [1 - \sigma_2 \sqrt{\pi\sigma_1} r(\sigma)], \quad (5)$$

где  $r(\sigma) = e^{\sigma^2} [1 - \text{erf}\sigma]$ ;  $\sigma = \frac{1}{\sqrt{\sigma_1}} + \sigma_2 \sqrt{\sigma_1}$ ;  $\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{\sigma_1}} - \sigma_2 \sqrt{\sigma_1}$ ;

$$\sigma_1 = \frac{4k_z X}{uH^2}; \quad \sigma_2 = \frac{wH}{4k_z}.$$

Некоторое несовпадение на рис. 3 положений максимумов аналитического и численного решений объясняется тем, что аналитическое решение построено в пренебрежении диффузией по  $x$  (из проведенных численных экспериментов следует, что при уменьшении коэффициента горизонтальной диффузии согласие аналитического решения с асимптотикой численного решения улучшается).

### 3. Валидации ХТМ\_ГГО на данных трассерных экспериментов

Методология валидации детерминированных физико-математических моделей распространения атмосферных примесей и, в частности, ХТМ до настоящего времени остается одним из наименее разработанных разделов теории атмосферной диффузии. Проблемы, возникающие при развитии этой методологии, связаны с тем, что

модели, основанные на решении уравнения (1), предсказывают неслучайные значения концентрации рассматриваемых атмосферных примесей, которые соответствуют заданной коэффициентами (1) метеорологической ситуации и распределению источников выбросов, в то время как измеренные концентрации содержат случайную компоненту («шум»), которая зачастую характеризуется высокой изменчивостью и связана со случайными флуктуациями скоростей и направлений ветра. Понятно, что в такой ситуации прямое «попарное» сопоставление результатов расчетов и измерений может привести к значительным различиям, которые формально могут интерпретироваться как погрешности модели, но в действительности в основном зависят от случайной составляющей измерений.

Соответствующие эффекты особенно заметны в случае распространения факела примеси от одиночного источника, когда влияние случайных пульсаций поля скоростей ветра, «слишком крупномасштабных» для того, чтобы они воспринимались как турбулентность и, в то же время, не разрешаемых метеорологическими драйверами, проявляется в виде так называемого меандрирования факела (этим термином пользуются при описании извилистой формы факела, изменяющейся с течением времени). Первая попытка включить эффект меандрирования факела в модели атмосферной диффузии локального масштаба была предпринята в пионерской работе Ф. Гиффорда (Gifford, 1959; см. также Гиффорд, 1962), где, в частности, с учетом этого эффекта при ряде упрощающих предположений получено аналитическое выражение для плотности вероятностей распределения измеряемых в фиксированной точке значений концентрации. В работе Genikhovich, Filatova (2001) была решена обратная (по отношению к результатам Гиффорда) задача корректировки измеренной при наличии меандрирования факела функции распределения концентраций, результатом которой является восстановление аналогичной функции распределения, но при отсутствии меандрирования. Следует отметить, однако, что обе указанные работы не нашли широкого применения при решении практических задач, что может быть частично вызвано известной сложностью использованного математического аппарата.

Традиционный подход к валидации моделей, который широко применяется за рубежом, основан на построении различных статистических характеристик («индикаторов») степени соответствия/несоответствия массивов попарно сгруппированных данных расчетов и измерений. Для таких индикаторов, описание которых можно найти, например, в работах Hanna (1988); Chang, Hanna (2004); Holmes, Morawska (2006) и др., обычно заранее известны значения, соответствующие «идеальному согласию» модельных расчетов и натуральных измерений. Как показано в статье Genikhovich (2003), удовлетворительное согласие практически невозможно, поскольку эти индикаторы «сконструированы» без учета принципиального различия в статистических свойствах результатов модельных расчетов и натуральных измерений, и, в частности, наличия в данных измерений интенсивного шума, связанного с меандрированием факела. Действительно, за счет такого меандрирования ось узкого (угловая ширина в среднем порядка  $10^\circ$ ) факела, которая для каждой дистанции (расстояния от источника выброса) соответствует максимальной приземной концентрации, с высокой вероятностью «промахивается» мимо прибора, регистрирующего загрязнение воздуха, причем при отклонениях, превышающих поперечный размер факела, прибор может вместо максимальных регистрировать практически нулевые концентрации. Важно подчеркнуть также, что используемые при «стандартной валидации» статистики, построенные по измеренным концентрациям, обычно не являются робастными, т. е. нечувствительными или малочувствительными к «шуму» в измерениях.

С целью уменьшения влияния меандрирования в ряде зарубежных работ для валидации локальные значения концентраций используются интегралы от концентраций вдоль прямых, перпендикулярных направлению ветра, или вдоль дуг концентрических окружностей с центром в точке, где размещается источник выброса трассера. Тем не менее, даже и в этом случае индикаторы согласия остаются «достаточно далекими» от своих «идеальных значений».

Определенный шаг вперед в развитии за рубежом методологии валидации моделей атмосферной диффузии связан с разработками в 2000 г. Американским обществом по тестированию и материаловедению (ASTM) стандарта ASTM D6589, в котором предложена методика статистической оценки эффективности моделей атмосферной диффузии (ASTM, 2000; Irwin et al., 2002), а также в 2009 г. Руководства Агентства по охране окружающей среды США (Guidance, 2009), которые предусматривают использование более современных статистических процедур, включая ансамблевое моделирование, бутстрап и др.

Применительно к задачам расчета загрязнения атмосферного воздуха в локальном/городском масштабе наиболее эффективным представляется используемый в России подход к валидации моделей атмосферной диффузии, исходный вариант которого предложен в ГГО в работах М. Е. Берлянда и связан с построением статистик экстремумов. В монографии Берлянда (1975), в частности, для каждой дистанции рассчитанные по модели максимальные концентрации сопоставляются с максимальным значением, снятым с огибающей облака экспериментальных значений концентрации, построенных на графике в зависимости от скорости ветра. При этом огибающая проводится таким образом, чтобы оставить выше нее примерно 1—2 % наиболее высоких, в том числе, отскочивших концентраций. Понятно, что при таком подходе уровень вызванных меандрированием шумов существенно уменьшается, поскольку попавшие на огибающую максимальные значения с очевидностью соответствуют ситуациям, когда ось факела не «промахнулась» мимо измерительного устройства, а попала на него. С целью упрощения этой процедуры Величко, Оникул, Панфилова (1984) предложили заменить построение огибающей на графике непосредственной оценкой по данным измерений 98-го перцентиля функции распределения (ФР) измеренных на данной дистанции концентраций, т. е. такого значения концентрации, вероятность превышения которого составляет 2 %.

В настоящее время валидация локальных/городских моделей проводится в ГГО методами, предложенными в статьях Genikhovich (1995, 2003, 2004), с использованием, в частности, мажорантной фильтрации измеренных концентраций, основанной на определении верхних процентилей ФР концентрации (рассматриваемых как ее измеренные «экстремумы»), и соответствующих «условных экстремумов», определяемых как верхние проценты ФР, построенной по выборке, которая включает значения концентраций, измеренных при соблюдении определенных условий (например, при попадании скоростей ветра и направлений ветра в определенные градации).

К сожалению, описанные процедуры не переносятся непосредственно на валидацию мезомасштабных/региональных моделей, в частности, потому, что для процессов переноса в таких масштабах любое измерение концентрации является уникальным, т. е. соответствует уникальному набору метеополей, обеспечивающих распространение трассера (примеси) от источника до точки наблюдения при, вообще говоря, уникальных траекториях переноса, характеристиках метеоусловий переноса и пр. В такой ситуации эффективными, по-видимому, могут оказаться только методы ансамблевого моделирования (см., например, Kalnay, 2003), в рамках которого один или несколько метеорологических драйверов генерируют ансамбль метеорологических полей, различающихся между собой за счет, например, разброса начальных и граничных условий (в пределах возможного влияния погрешностей измерений метеоприборов), различий в используемых параметризациях и схемах численного интегрирования и пр. Решая уравнение (1) с коэффициентами, соответствующими каждому из этих членов ансамбля, можно получить псевдослучайный ансамбль полей концентраций и, в частности, псевдослучайный набор значений концентрации в точках, где были установлены измерительные приборы, а затем пытаться сконструировать на этом ансамбле такие статистики, которые можно было бы сопоставлять с данными измерений.

Для эффективной реализации такой схемы валидации, однако, необходимы мощные вычислительные платформы. Более того, достаточно очевидно, что использование при валидации мезомасштабных/региональных моделей «стандартных» ансамблевых статистик может оказаться неэффективным. Действительно, пусть, например, имеется ансамбль из  $N$  реализаций метеополей, которому соответствуют  $N$  расчетов распространения трассера от его источника. Примем также, что при этом в  $N_1$  случаях факел «накрыл» точку размещения измерительного устройства («прибора»), а в  $N_2 = N - N_1$  случаях «промахнулся». Будем также считать для простоты, что если в модельных расчетах факел «попал» на точку размещения прибора, то расчетная концентрация в этой точке равна  $C$ , а в противном случае она равна нулю. Тогда очевидно, что средняя по ансамблю концентрация в точке размещения прибора равна  $CN_1/N$ .

Будем теперь полагать, что наша модель «настолько идеальна», что результат измерения в случае накрытия факелом прибора точно совпадает с предсказанием модели, т. е. тоже равен  $C$ . Следует напомнить, однако, что измерение является случайным числом, которое в зависимости от того, накрыл ли реальный факел прибор или промахнулся, принимает случайным образом значения либо  $C$ , либо ноль. Если теперь определить относительную погрешность выражением  $(\text{расчет} - \text{измерение})/\text{измерение}$ , то в случае факела, накрывшего прибор, относительная погрешность оказывается равной  $-N_2/N$  (изменяется от 0 до  $-100\%$ ). Если же измерение соответствует «промахнувшемуся факелу», то относительная погрешность ансамблевого моделирования оказывается равной бесконечности. Понятно, что в более реалистичном случае, когда предсказываются не два значения концентрации, а некий набор таких значений, спектр значений погрешности окажется более гладким, но, тем не менее, в большом числе случаев эти погрешности могут оказаться чрезвычайно большими.

Ситуация не слишком улучшается, если результат ансамблевого моделирования характеризуется не обычным арифметическим средним значением, а его робастным аналогом, т. е. медианой.



Действительно, в таком варианте при указанных выше предположениях рассчитанная по ансамблю концентрация также может принимать два значения: 0, если  $N_1 < N_2$ , и  $C$  в противном случае. Такие же значения случайным образом принимает результат измерений, что приводит к погрешностям, равным либо нулю, либо 100 %, либо бесконечности. Заметим, наконец, что проведенный выше анализ показывает, кроме всего прочего, что качество ансамблевого моделирования в рассмотренных случаях оказывается существенно зависящим от успешности воспроизведения метеорологическим драйвером участка спектра атмосферных пульсаций скоростей ветра, ответственного за меандрирование факела, т. е. от характеристики, на которую при разработке моделей численного прогноза погоды едва ли обращается серьезное внимание.

По-видимому, наиболее эффективным при валидации на данных трассерных экспериментов результатом ансамблевых расчетов по мезо/региональным моделям оказывается аппарат мажорантной фильтрации. При этом с данными измерений сопоставляются либо (при достаточно большом ансамбле) определенный верхний процентиль функции распределения значений концентраций, соответствующих точке размещения прибора и моментам времени, когда проводились эти измерения, либо (при малом количестве членов ансамбля) максимальная из рассчитанных для этой точки концентрация.

Дальнейшее сокращение объема вычислительной работы связано с отказом от традиционной методологии построения ансамбля с использованием в той или иной степени случайного набора реализаций, определяющих перенос атмосферных метеополей, каждое из которых независимо генерируется метеорологическим драйвером или ансамблем таких драйверов. При валидации на данных трассерных экспериментов с использованием мажорантной фильтрации такой «случайный» ансамбль строится для того, чтобы, по крайней мере, какие-то из его реализаций обеспечили точное попадание оси факела трассера на измерительный прибор. Если от построения такого ансамбля отказаться и ограничиться

метеорологическим ансамблем из одного элемента, то ось факела может за счет меандрирования отклониться от прибора, причем стандартное отклонение для разброса соответствующих траекторий примерно составляет  $l = 0,1 x$ , где для приближенной оценки можно принять  $x$  равным расстоянию от источника выброса до прибора (Гандин и др., 1955). Если мысленно развернуть в обратном направлении компоненты скорости потока и время, то это же значение  $l$  может рассматриваться как масштаб размеров такой окрестности вокруг точки фактического расположения источника выброса, что при выпуске трассера в любой из точек этой окрестности ось факела примеси с учетом ее меандрирования может точно попасть на прибор. Отсюда очевидно, что для оценки максимальных концентраций, регистрируемых прибором, мы можем провести расчеты переноса примеси одним и тем же средним потоком, используя при этом ансамбль рассчитанных концентраций в точке размещения прибора при различных расположениях источника выбросов внутри указанной окрестности (для краткости такой метод построения ансамбля будет далее упоминаться как «метод блуждающего ансамбля»).

Для валидации ХТМ\_ГГО на натуральных данных были использованы материалы трассерного эксперимента CARTEX, проведенного на северо-востоке США в сентябре—октябре 1983 года (CARTEX '83, 1986). В качестве трассера использовался перфторуглерод [РМСН]:  $C_7F_{14}$ , являющийся инертным, безвредным газом с низкими естественными фоновыми концентрациями (порядка  $3 \cdot 10^{-11}$  г/м<sup>3</sup>). Точками выпуска трассера являлись города Дейтон (штат Огайо, США) и Большой Садбери (провинция Онтарио, Канада).

Эксперимент состоял из семи этапов, в ходе которых перфторуглерод выпускался в течение трех часов из одной точки. В дальнейшем по всему району исследований производились измерения концентраций с помощью газоанализаторов в течение трех суток. Выпуски на этапах 1, 2, 3, 4, 6 были произведены из Дейтона, а на этапах 5 и 7 — из Большого Садбери. За время каждого из них было выпущено в атмосферу порядка 180—200 кг вещества, за исключением 6 этапа, когда выброс составил 32 кг.

Выпуск перфторуглерода осуществлялся на уровне земли в течение 3-х часов при благоприятных метеорологических условиях — в случаях, когда преобладающее направление ветра способствовало переносу примеси в сторону наблюдательной сети. В измерениях использовались автоматические пробоотборники, которые были размещены на 86 станциях в штатах Огайо, Пенсильвания, Нью-Джерси, Нью-Йорк, в Новой Англии и на юго-востоке Канады на расстояниях от 300 до 1100 км от места выброса. После начала работы источника на станциях мониторинга осуществлялся отбор шести последовательных проб воздуха продолжительностью от 3 до 6 часов.

В качестве метеорологического драйвера при расчетах полей приземных концентраций перфторуглерода с помощью XTM\_ГГО использовался WRF, причем метеопольа определялись на сетке 170 x 170 с шагом 10 км. По результатам расчетов построены функции распределения (ФР) отношения  $C_{\text{эксперимент}}/C_{\text{расчет}}$ . Для примера ФР для этапов 1 и 3 показаны на рис. 4. При интерпретации полученных результатов следует иметь в виду, что шум, содержащийся в измерениях, связан не только с меандрированием факела, и что рассчитанные максимальные концентрации могут, в принципе, быть не только выше, но и ниже измеренных, что соответствует превышающим единицу значениям указанных отношений.

Из рис. 4, в частности, видно, что для 1 этапа с вероятностью 78 % отношение измеренных концентраций к рассчитанным методом блуждающего ансамбля максимумам не превышает 3, а для 3 этапа с вероятностью 81 % отношение не превышает 2. Таким образом, использованный алгоритм построения расчетной мажоранты концентраций с помощью XTM\_ГГО с метеодрайвером WRF оказался эффективным (по этому критерию XTM\_ГГО превосходит аналогичные показатели даже гауссовых моделей, не говоря уже об известных зарубежных региональных моделях). Аналогичный вывод был сделан в результате сопоставления расчетов с данными трассерного эксперимента ANATEX.

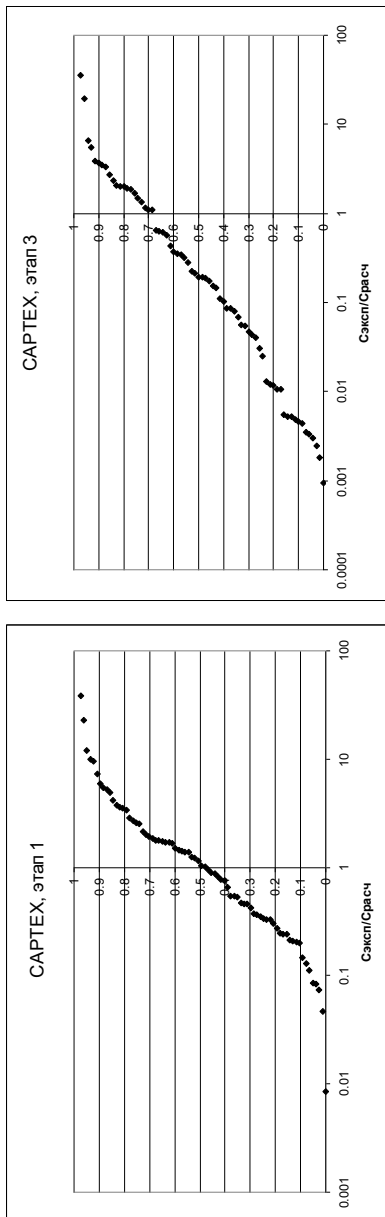


Рис. 4. ФР отношения  $C_{\text{экспл}}/C_{\text{расч}}$  для эксперимента CARTeX, этап 1 (левая панель) и этап 3 (правая панель).

#### **4. Применения ХТМ\_ГГО при решении задач моделирования и прогноза загрязнения воздуха и оценки последствий изменения климата**

По разработанной модели были проведены расчеты загрязнения воздушного бассейна Санкт-Петербурга, причем центр расчетной области располагался в точке с координатами 59,94° с. ш. и 30,31° в. д., шаги сетки по горизонтали были выбраны равными 5 км при сетке 28 x 28 узлов. В расчетах использована городская база данных инвентаризации выбросов Санкт-Петербурга за 2013 г., содержащая информацию о более чем 20 тыс. точечных источников и 1500 отрезках автомагистралей. Данные были агрегированы по 17 ячейкам сетки, покрывающим непосредственно территорию города, причем в зависимости от высот объединяемых источников мощности выброса в каждой ячейке суммировались и относились к одной из следующих шести возможных высот объединенных источников над уровнем подстилающей поверхности: 0 м; 5 м; 30 м; 75 м; 125 м и 165 м. Детальный анализ полученных результатов расчетов на основе ХТМ\_ГГО, включая описание методологии численного прогноза загрязнения воздуха, которая разработана в ГГО, а также сопоставление результатов расчетов и измерений на сети станций инструментального мониторинга будут проведены в отдельной публикации.

В качестве примера в настоящей статье на рис. 5 приведено расчетное поле концентраций СО на 21.01.2013 г. (срок 14:01) для всей совокупности источников выброса Санкт-Петербурга. Сплошными линиями на этом рисунке показаны контуры береговой черты Финского залива и Ладожского озера, а стрелками нанесена информация о скоростях и направлениях ветра. Следует отметить, что в выполненных расчетах с целью оценки вклада собственных источников города фоновые концентрации СО на «входных» для воздушного потока границах области интегрирования задавались равными нулю, что могло привести к некоторому занижению рассчитанных концентраций.

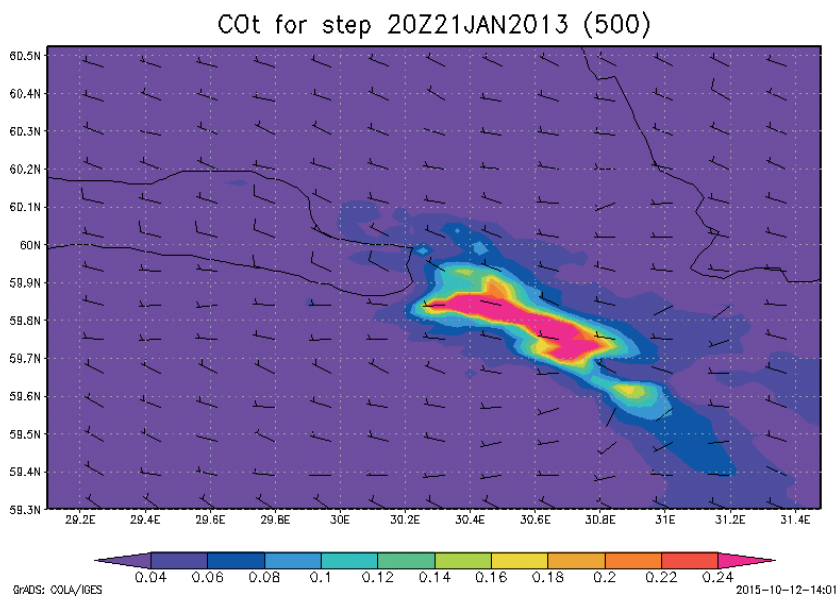


Рис. 5. Поле приземных концентраций CO в Санкт-Петербурге от 21.01.2013 г. (срок 14:01).

В заключении данного раздела целесообразно обсудить специфику использования ХТМ (в частности, ХТМ\_ГГО) для оценки воздействия возможных изменений климата на характеристики загрязнения атмосферы, соответствующие ожидаемым климатическим условиям с упором, в первую очередь, на характеристики пространственной изменчивости антропогенных химических загрязнителей, поступающих в атмосферу с выбросами промышленности, энергетики, транспорта и др. Основная особенность возникающих при этом задач связана со значительной неоднородностью пространственного распределения источников выбросов таких загрязнителей и, как следствие, значительной пространственной неоднородностью соответствующих полей концентрации: для сильно перегретых

выбросов, например, из дымовых труб тепловой электростанции, наибольшие значения приземной концентрации при неблагоприятных метеорологических условиях распространения примесей достигаются на расстояниях порядка двадцати высот дымовой трубы (т. е. на удалениях порядка двух километров от источника), а для холодных выбросов аналогичные расстояния могут оказаться в несколько раз меньше.

Существующая методология оценки регионального загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата связана с последовательным применением даунскейлинга (телескопизации): сначала решается задача моделирования изменений климата в глобальном масштабе, а затем для улучшения пространственного разрешения в пределах выделенного региона решается задача более детального моделирования изменений климата в региональном масштабе. В работах, проводимых в ГГО, представляется целесообразным использовать для этого «связку» из глобальной модели изменения климата ГГО и региональной модели изменения климата (РКМ) ГГО, причем последняя модель может, в принципе, использоваться как метеорологический драйвер для ХТМ\_ГГО.

К сожалению, практическая реализация описанной методологии связана с определенными техническими трудностями, которые, прежде всего, объясняются высокими требованиями к мощности используемых вычислительных платформ, объему доступной памяти компьютера и другим техническим характеристикам вычислительных устройств. В частности, при использовании РКМ как драйвера ХТМ в режиме off line возникают проблемы хранения полей определяющих метеопараметров, которые дополнительно усугубляются при попытке обеспечить достаточно высокое разрешение, что в нашей задаче, как было отмечено выше, требуется при расчетах по ХТМ. Обеспечить такое разрешение можно путем введения дополнительного этапа даунскейлинга (например, с помощью WRF), но это приведет к дополнительному увеличению объема вычислительных работ. Еще более усложняет ситуацию то обстоятельство, что РКМ обеспечивает ансамблевое моделирование и что, следовательно, в таком же режиме должна работать ХТМ. В настоящий момент наиболее практичный

выход из этого затруднительного положения связан с использованием модели распространения атмосферных примесей типа «источник—рецептор», описанной в статье (Генихович и др., 2016). При этом входная информация для расчетов по этой модели может быть получена на основе постпроцессинга результатов расчетов по РКМ ГГО.

## 5. Заключение

Приведенные в данной статье материалы можно рассматривать как подтверждение перспективности использования ХТМ\_ГГО при решении довольно широкого круга задач, связанных с моделированием и прогнозом загрязнения атмосферного воздуха в мезо- и региональном масштабе, оценкой воздействия возможных изменений климата на характеристики загрязнения атмосферы и пр. Высокая эффективность разработки и внедрения в практику ХТМ в настоящее время подтверждается бурным развитием соответствующего научного направления во всем мире. Можно полагать, что для России в силу размеров ее территории и сравнительно слабой освещенности ее отдельных регионов данными инструментального мониторинга загрязнения воздуха практическая польза от внедрения ХТМ окажется даже выше, чем за рубежом.

Необходимо подчеркнуть, однако, что практическое использование ХТМ связано с необходимостью задавать достоверные исходные данные для расчетов. В нашей стране с получением таких данных имеются определенные сложности. Прежде всего, это относится к материалам инвентаризации источников выбросов. В странах Евросоюза и в США в течение нескольких последних десятилетий значительные усилия были направлены на разработку соответствующей методологии, сбор, контроль и анализ соответствующей первичной информации, создание баз данных по выбросам, основная часть которых является общедоступной, и др. Важным элементом функционирования за рубежом системы сбора и систематизации выбросов является внедрение необходимой нормативно-правовой базы и создание специализированных научно-



методических центров, обеспечивающих функционирование и поддержку системы. Представляется, что в ближайшем будущем в России необходимо провести аналогичные работы и обеспечить возможность широкого доступа к базам соответствующих данных.

*Настоящая работа выполнена в рамках Целевой научно-технической программы Росгидромета и, частично, при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00753 а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Алоян А. Е.* (2002). Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Курс лекций. — М.: ИВМ РАН. 201 с.

*Берлянд М. Е.* (1975). Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 448 с.

*Величко Г. Г., Оникул Р. И., Панфилова Г. А.* (1984). Проверка методики расчета загрязнения атмосферы на материалах экспериментальных исследований в районах предприятий алюминиевой промышленности // Труды ГГО. Вып. 479. С. 48—56.

*Гандин Л.С. и др.* (1955) Основы динамической метеорологии. // Гандин Л.С., Лайхтман Д.Л., Матвеев Л.Т, Юдин М.И. - Л.: Гидрометеорологическое изд. — 647 с.

*Генихович Е. Л.* (1984). Оценка количества примеси, вымываемой осадками из дымового факела // Труды ГГО. Вып. 479. С. 30—38.

*Генихович Е. Л., Грачева И. Г., Румянцев Д. Ю., Яковлева Е. А.* (2016). Модель распространения атмосферных примесей типа «источник—рецептор» для оценки по климатическим данным антропогенной нагрузки на окружающую среду в мезо- и региональном масштабе // Настоящий сборник.

*Генихович Е. Л., Осипова Г. И.* (1984). Определение коэффициента турбулентности по данным стандартных метеорологических наблюдений // Труды ГГО. Вып. 479. С. 62—69.

*Гиффорд Ф.* (1962). Статистическая модель дымовой струи / В сб.: Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха / Пер. под ред. А. С. Монина. — М.: Изд-во иностр. литературы. С. 143—164.

*Марчук Г. И.* (1982 а). Численное решение задач динамики атмосферы и океана. — Л.: Гидрометеиздат. 303 с.

*Марчук Г. И.* (1982 б). Математическое моделирование в проблеме охраны окружающей среды. — М.: Наука. 319 с.

Пененко В. В., Алоян А. Е. (1985). Модели и методы для задач охраны окружающей среды. — М.: Наука. 254 с.

ASTM (2000). Standard Guide for Statistical Evaluation of Atmospheric Dispersion Model Performance (D 6589). — American Society for Testing and Materials. 17 p.

Baklanov A., Mahura A., Sokhi R. S. (eds.) (2011). Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models. — Springer. 242 p.

Baklanov A., Schlutzen K. H., Suppan P., Baldasano J., Brunner D., Aksoyoglu S., Carmichael G., Douros J., Flemming J., Forkel R., Galmarini S., Gauss M., Grell G., Hirt M., Joffre S., Jorba O., Kaas E., Kaasik M., Kallos G., Kong X., Korsholm U., Kurganskiy A., Kushta J., Lohmann U., Mahura A., Manders-Groot A., Maurizi A., Moussiopoulos N., Rao S. T., Savage N., Seigneur C., Sokhi R., Solazzo E., Solomos S., Sørensen B., Tsegas G., Vignati E., Vogel B., Zhang Y. (2013). Online coupled regional meteorology-chemistry models in Europe: current status and prospects // Atmos. Chem. Phys. Discuss. V. 13. P. 12541—12724.

Bessagnet B., Hodzic A., Vautard R., Beekmann M., Cheinet S., Honoré C., Liousse C., Rouil L. (2004). Aerosol modeling with CHIMERE: preliminary evaluation at the continental scale // Atmos. Environ. V. 38. P. 2803—2817.

Bott A. (1993). The monotone area-preserving flux-form advection algorithm: reducing the timesplit error in the two-dimensional flow fields // Mon. Weather Rev. V. 121. P. 2638—2641.

CAPTEX' 83 (1986). Cross-Appalachian Tracer Experiment (CAPTEX' 83). Final Report / NOAA Technical Memorandum ERL ARL-142. — Air Resources Laboratory. Silver Spring. Maryland. 60 p.

Chang J. C., Hanna S. R. (2004). Air quality model performance evaluation // Meteorology and Atmospheric Physics. V. 87. P. 167—196. Doi: 10.1007/s00703-003-0070-7.

Damian V., Sandu A., Potra F., Carmichael G. (2002). The kinetic preprocessor KPP — a software environment for solving chemical kinetics // Computers and Chemical Engineering. V. 26. № 11. P. 1567—1579.

Galperin M. (1999). Approaches for improving the numerical solution of the advection equation // In: Large Scale Computations in Air Pollution Modeling / Z. Zlatev, J. Dongarra, I. Dimov, J. Brandt, P. J. Builtjes eds. P. 161—172.

Galperin M., Genikhovich E., Sofiev M., Gracheva I., Vira J., Soares J. (2010). Meso-to-global modeling of atmospheric transport: numerical recipes, tests and applications / In: Air Pollution Modeling and its Application XX / D. G. Steyn, S. T. Rao eds. // Springer. P. 147—150. ISBN: 978-90-481-3811-1.

Genikhovich E. L. (1995). Practical applications of regulatory diffusion models in Russia // Intern. Journal of Environment and Pollution. V. 4—5. № 4—6. P. 530—537.

*Genikhovich E.* (2003). Indicators of performance of dispersion models and their reference values // *Int. J. Environment and Pollution*. V. 20. № 1—6. P. 321—329.

*Genikhovich E. L.* (2004). Statistical approach to deterministic modeling of air pollution and its applications in Russia / In: *Air Pollution Modelling and Its Applications XVI* / C. Borrego, S. Incecik eds. — Kluwer Academic/Plenum Press. P. 3—18.

*Genikhovich E., Filatova E.* (2001). A PDF approach to processing the data of tracer experiments for validation the dispersion models / In: *Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. Belgirate, Italy, May 28—31 // *Proc. of the 7<sup>th</sup> Intern. Conf.* P. 33—36.

*Genikhovich E. L., Sofiev M., Gracheva I. G.* (2007). Interaction between meteorological and dispersion models at different scales / In: *Air Pollution Modelling and Its Applications XVII* / C. Borrego, A.-L. Norman eds. // Springer. P. 158—166. ISBN-10: 0-387-28255-6.

*Gery M. W., Whitten G. Z., Killus J. P.* (1986). Development and testing of the CBM-IV for urban and regional modeling. Contract № 68-02-4136. 431 p.

*Gifford F.* (1959). Statistical properties of a fluctuating puff dispersion model / In: *Advances in Geophysics* / F. N. Frenkiel and P. A. Sheppard eds. V. 6. P. 117—138.

*Grell G. A., Baklanov A.* (2011). Integrated modelling for forecasting weather and air quality: a call for fully coupled approaches // *Atmos. Environ.* V. 45. P. 6845—6851.

*Grell G. A., Dudhia J., Stauffier D. R.* (1995). A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model. NCAR Tech. Note NCAR/TN-398-398+ST. 122 p. <http://www.mmm.ucar.edu>.

*Groisman P. Ya., Genikhovich E. L.* (1997). Assessing Surface-Atmosphere Interactions Using Former Soviet Union Standard Meteorological Network Data. Part 1: Method // *Journal of Climate*. V. 10. № 9. P. 2154—2183.

Guidance (2009). Guidance on the Development, Evaluation and Application of Environmental Models EPA/100/K-09/003. US EPA. 90 p.

*Hanna S. R.* (1988). Air quality model evaluation and uncertainty // *Journal Air Pollution Control Assoc.* V. 38. № 4. P. 406—412. Doi: 10.1080/08940630.1988.10466390.

*Hogo H., Gery M. W., Dodge M. C.* (1998). User's Guide for Executing OZPM-4 with CBM-IV or Optional Mechanisms. Contract № 68-02-4136 // *Atm. Sci. Res. Lab. RTP NC.* 246 p.

*Holmes N. S., Morawska L.* (2006). A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available // *Atmospheric Environment*. V. 40 (30). P. 5902—5928.

*Hu Y., Talat Odman M.* (2008). A comparison of mass conservation methods for air quality models // *Atmospheric Environment*. V. 42. P. 8322—8330.

*Irwin J. S., Carruthers D., Paumier J., Stocker J.* (2002). Application of ASTM D6589 to evaluate dispersion model performance to simulate average centerline concentration values / In: «8<sup>th</sup> Int. Conf. on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. HARMO 8». P. 53—57.

*Kalnay E.* (2003). Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. — Cambridge University Press. 341 p.

*Korsholm U. S., Baklanov A., Gross A., Mahura A., Sass B. H., Kaas E.* (2008). Online coupled chemical weather forecasting based on HIRLAM — overview and prospective of Enviro-HIRLAM // HIRLAM Newsletter. № 54. P. 151—168.

*Mircea M., D'Isidoro M., Maurizi A., Vitali L., Monforti F., Zanini G., Tampieri F.* (2008). A comprehensive performance evaluation of the air quality model BOLCHEM to reproduce the ozone concentrations over Italy // Atmos. Environ. V. 42. P. 1169—1185.

*Saide P. E., Spak S. N., Carmichael G. R., Mena-Carrasco M. A., Howell S., Leon D. C., Snider J. R., Bandy A. R., Collett J. L., Benedict K. B., de Szoeke S. P., Hawkins L. N., Allen G., Crawford I., Crosier J., Springston S. R.* (2011). Evaluating WRF-Chem aerosol indirect effects in Southeast Pacific marine stratocumulus during VOCALS-Rex // Atmos. Chem. Phys. Discuss. V. 11. P. 29723—29775.

*Sandu A., Sander R.* (2006). Technical note: Simulating chemical systems in Fortran90 and Matlab with the Kinetic PreProcessor KPP-2.1 // Atmos. Chem. Phys. V. 6. P. 187—195.

Sandu, A. et al. (1997) Benchmarking stiff ODE solvers for atmospheric chemistry problems - I. Implicit vs explicit// A. Sandu, J.G. Verwer, M. van Loon, G.R. Carmichael, F.A. Potra, D. Dabdub, J.H. Seinfeld.- Atmospheric Environment, 31(19), pp.3151–3166.

*Schlünzen K. H., Sokhi R. S.* (2008). Overview of tools and methods for meteorological and air pollution mesoscale model evaluation and user training. Joint Report of COST Action 728 (Enhancing Mesoscale Meteorological Modelling Capabilities for Air Pollution and Dispersion Applications) and GURME (GAW Urban Research Meteorology and Environment Project). GAW Rpt. № 181. WMO. 116 p.

*Simpson D., Fagerli H., Jonson J. E., Tsyro S., Wind P., Tuovinen J.-P.* (2003). Transboundary Acidification, Eutrophication Ground Level Ozone in Europe. Part 1. Unified EMEP Model Description // EMEP Status Report, Norwegian Meteorological Institute. 102 p.

*Simpson D., Ben A., Berge H., Bergstrom R., Emberson L. D., Fagerli H., Flechard C. R., Hayman G. D., Gauss M., Jonson J. E., Jenkin M. E., Ny'iri A., Richter C., Semeena V. S., Tsyro S., Tuovinen J.-P., Valdebenito A., Wind P.* (2012). The EMEP MSC-W chemical transport model — technical description // Atmos. Chem. Phys. V. 12. P. 7825—7865 (сопровождающие материалы: <http://www.atmos-chem-phys.net/12/7825/2012/acp-12-7825-2012-supplement.pdf>).

*Smagorinsky, J.*, (1993): Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities. In: B. Galperin, S. A. Orszag (eds.) Large Eddy Simulation of Complex Engineering and geophysical Flows. Cambridge University Press. – P. 3 – 36.

*Sofiev M., Galperin M., Genikhovich E.* (2008). Construction and evaluation of Eulerian dynamic core for the air quality and emergency modelling system SILAM. In: C. Borrego, A. I. Miranda (eds.) Air Pollution Modelling and Its Application XIX. NATO Sci. Peace Security. Ser. C. Environ. Security. — NY: Springer. P. 699—701.

*Sofiev M., Genikhovich E., Keronen P., Vesala T.* (2010). Diagnosing the surface layer parameters for dispersion models within the meteorological-to-dispersion modeling interface // J. Appl. Meteor. Climatol. v. 49. Iss. 2. p. 221—233. Doi: 10.1175/2009JAMC2210.

*Sofiev M., Vira J., Kouznetsov R., Prank M., Soares J., Genikhovich E.* (2015). Construction of the SILAM Eulerian atmospheric dispersion model based on the advection algorithm of Michael Galperin // Geoscientific Model Development. V. 8. P. 3497—3522. Doi: 10.5194/gmd-8-3497-2015. [www.geosci-model-dev.net/8/3497/2015/](http://www.geosci-model-dev.net/8/3497/2015/).

*Vogel B., Vogel H., Bäumer D., Bangert M., Lundgren K., Rinke R., Stanelle T.* (2009). The comprehensive model system COSMO-ART — Radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale // Atmos. Chem. Phys. V. 9. p. 8661—8680. Doi: 10.5194/acp-9-8661-2009.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ  
АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ОЦЕНКА  
ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕССЫ РАССЕЙВАНИЯ ТУМАНА**

*М. А. Васильева<sup>4</sup>, Н. В. Жохова<sup>1</sup>, А. А. Палей<sup>2</sup>, Ю. В. Писанко<sup>2</sup>,  
А. Е. Солодина<sup>3</sup>, Л. И. Толтыгин<sup>1</sup>, К. М. Филипченко<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Государственный океанографический институт  
119034 Москва, Кропоткинский пер., д.6.  
e-mail goin@bk.ru

<sup>2</sup> Институт прикладной геофизики  
129128 Москва, ул. Ростокинская, 9

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет)  
141700 Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

<sup>4</sup> Московский государственный университет путей сообщения  
127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9

Поступила в редакцию 20.12.2015  
Поступила после доработки 6.02.2016

### **Введение**

Туманы представляют из себя смесь мельчайших капель воды или кристаллов льда, взвешенных в воздухе. Туманы возникают в естественных условиях и могут быть обусловлены различными причинами. Рассеивая свет, туманы уменьшают видимость и зачастую препятствуют нормальному функционированию транспортных систем (аэропортов, автомобильных дорог). Проблеме поиска методов рассеяния и просветления туманов уделяется большое внимание.

В настоящее время разработаны и доведены до практического применения методики воздействия на переохлаждённые туманы (туманы, состоящие из переохлажденных капель), но для теплых туманов надёжных и эффективных методов их рассеяния пока не разработано.

Переохлажденные туманы рассеиваются в основном путем создания дополнительных центров кристаллизации. Для этого в туман вводятся кристаллические реагенты, растворы неорганических солей, поверхностно-активных веществ и др. Несмотря на наличие определённых трудностей, подобные методы нашли практическое применение (Качурин , 1990; Borisov , 2011).

Термодинамическое равновесие тёплых туманов гораздо более устойчиво, чем переохлаждённых. Это существенно осложняет воздействие на них.

Рассмотрим некоторые методы рассеяния теплых туманов.

Давно известен и применяется на практике способ рассеяния тумана с помощью искусственных тепловых источников<sup>1</sup>. Основным механизмом воздействия в данном подходе является ускорение процессов испарения за счёт повышения температуры воздуха. При достаточном прогреве можно добиться сокращения времени рассеяния тумана в несколько раз. Однако поскольку прогреваются не только капли воды, а вся воздушная масса целиком, этот подход требует больших энергетических затрат (Williams, 1996).

Увеличивая поглощательные свойства тумана в диапазоне инфракрасного излучения, можно также добиться улучшения видимости. Для этого в область тумана вводят реагенты, увеличивающие его поглощательную способность. Соответствующие реагенты как правило вводятся в туман авиационным распылением. При этом в верхнем слое тумана поглощательная способность капель увеличивается, температура их повышается, а процесс их испарения усиливается. Уменьшение размеров капель при сохранении их числа делает туман более прозрачным. Данный способ наиболее эффективно рассеивает верхний слой тумана и не подходит для более плотных туманов с устойчивой стратификацией (Borisov , 2011).

Среди неэлектрических методов просветления туманов можно упомянуть метод акустического воздействия. Звуковые волны приводят к ряду эффектов, способных ускорить рассеяние тумана. В

---

<sup>1</sup> Например, с помощью топливных горелок, установленных вблизи взлетно-посадочной полосы.

первую очередь, колебательные процессы приводят к ускоренной частоте взаимодействия капель воды, а потому ускоряют процессы коагуляции. При этом колебания капель воды зависят от их размеров, частицы будут колебаться по-разному, и эти сдвиги фаз также способствуют коагуляционным процессам.

Существуют и ряд других эффектов (например, изменение температуры вследствие локального колебания давления), нарушающих термодинамическое равновесие системы вода-пар, а, следовательно, уменьшающих устойчивость тумана. Недостатком данного метода является малая его изученность на туманах, возникающих в естественной среде, и отсутствие в настоящий момент практических разработок (Михайленко, Валеева, 2013).

Наиболее перспективными можно считать различные методы влияния на туманы с использованием электрических эффектов. Капли воды электрически нейтральны, поэтому однородное электрическое поле не вызовет их движение. Возможны два основных направления применения электрических эффектов: воздействие однородным полем с предварительным заряданием капель тумана и воздействие неоднородным электрическим полем, которое будет ускорять поляризованные капли.

Следует также отметить, что даже в отсутствие внешнего электрического поля электрические эффекты могут оказывать существенное влияние на свойства и устойчивость туманов. Так, наличие электрического заряда у аэрозольных частиц, распыленных в воздухе, ускоряет процессы конденсации, в том числе и в ненасыщенном паре (Лапшин и др., 2002; Палей и др., 2007). Действие химических реагентов на переохлаждённый воздух может обуславливаться наличием на их поверхности различных дефектов и неоднородностей даже в большей степени, чем химической структурой (Никандров, 1959).

Зарядание капель тумана возможно с помощью использования коронного разряда, создающего сильное электрическое поле и спонтанную ионизацию. Ионы могут связываться с каплями воды, придавая им электрический заряд, а заряженные капли могут увлекаться внешним электрическим полем (Frost, 1981; Parker, 2012).



Значительный объем экспериментальных исследований по рассеиванию тумана с использованием коронного разряда проведен в большой аэрозольной камере НПО «Тайфун». (Lapshin et al., 2011; Paley, Romanov, 2013)

Однако для коронного разряда требуются большие энергетические затраты и высокая точность выполнения зазора между коронирующими и осадительными электродами, что приводит к удорожанию конструкции.

В этой связи для рассеивания тумана представляется более рациональным использование неоднородного электрического поля. В электрическом поле происходит дипольная поляризация водной компоненты смеси, которая под действием неоднородного электрического поля движется вдоль силовых линий, что и обеспечивает ускорение процесса рассеивания тумана. Проведенные в аэрозольной камере Института прикладной геофизики (ИПГ) эксперименты показали высокую эффективность применения неоднородного электрического поля для очистки воздуха от аэрозольных частиц. (Толпыгин и др., 2014).

По результатам предварительных экспериментов в аэрозольной камере ИПГ размером  $2 \times 0,8 \times 1,3$  м было установлено, что процесс естественного рассеивания тумана занимал от десяти минут до получаса. При подаче напряжения на находящийся в центре камеры электрод диаметром 40 мм через 5—10 с наблюдалось заметное просветление тумана, который в течение 1—2 мин полностью рассеивался. Рассеяние тумана происходило тем быстрее, чем больше было подаваемое напряжение. При этом энергетические затраты были столь незначительны, что зарегистрировать их имевшимся в распоряжении оборудованием не представилось возможным.

Целью работы является теоретическое описание движения капель тумана в неоднородном электрическом поле, создаваемом цилиндрическим электродом, позволяющее производить количественные оценки воздействия электрического поля на процесс рассеивания тумана.

## Математическая модель

Рассматривается двухкомпонентная среда, представляющая собой смесь сухого воздуха и тумана (водная компонента). Поскольку диэлектрическая проницаемость воздуха близка к единице, действием электрического поля на воздух можно пренебречь. Влияние электрического поля на туман описывается (объёмной) силой Гельмгольца:

$$\vec{f} = \frac{\varepsilon - 1}{8\pi} \vec{\nabla} E^2 \quad (1)$$

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость водной компоненты.

$E$  — напряженность электрического поля

Также в предлагаемой модели учитывается влияние (объёмной) силы, характеризующей взаимодействие компонент смеси:

$$\vec{f}_S = K \alpha_1 \alpha_2 (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — объёмные доли водной и воздушной компонент,

$v_1, v_2$  — скорости водной и воздушной компонент,

$K$  — коэффициент, характеризующий силу взаимодействия компонент.

Тогда полная система уравнений, описывающая динамику двухфазной системы (Нигматулин, 1987), имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_1^0 \alpha_1}{\partial t} + \vec{\nabla} (\rho_1^0 \alpha_1 \vec{v}_1) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_2^0 \alpha_2}{\partial t} + \vec{\nabla} (\rho_2^0 \alpha_2 \vec{v}_2) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1^0 \alpha_1 \left( \frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} + (\vec{v}_1, \vec{\nabla}) \cdot \vec{v}_1 \right) \\ & = -\alpha_1 \vec{\nabla} P + \frac{\varepsilon - 1}{8\pi} \vec{\nabla} E^2 - K \alpha_1 \alpha_2 (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rho_2^0 \alpha_2 \left( \frac{\partial \vec{v}_2}{\partial t} + (\vec{v}_2, \vec{\nabla}) \cdot \vec{v}_2 \right) = -\alpha_2 \vec{\nabla} P + K \alpha_1 \alpha_2 (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \quad (6)$$

Индекс 1 здесь и далее относится к параметрам водной компоненты, а индекс 2 – к параметрам воздуха. В этих уравнениях

$\rho_i^0$  — удельная плотность фазы (отношение массы фазы к объёму, занимаемому фазой),

$\alpha_i$  — объёмная доля фазы (отношение объёма данной фазы к общему объёму смеси),  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  по определению

$\vec{v}_i$  — скорость фазы,

$P = p_1 + p_2$  – суммарное давление смеси.

Уравнения (3), (4) описывают закон сохранения масс компонент смеси (уравнения непрерывности). Уравнения (5), (6) описывают динамику фаз при воздействии внешних сил: градиента давления, силы Гельмгольца и силы Стокса. Будем предполагать баротропность фаз, т.е.  $\rho_{1,2}^0 = \rho_{1,2}^0(P)$ . В модели и водная и воздушная компонента рассматриваются как идеальные газы.

Рассматривается случай, когда внешнее электрическое поле  $\vec{E}$  создаётся цилиндрическим электродом. Поэтому будем считать, что в задаче имеется точная цилиндрическая симметрия. О влиянии краевых эффектов будет сказано позже.

В цилиндрической системе координат  $(r, \phi, z)$  у всех векторов будет только составляющая, перпендикулярная оси цилиндра, которую мы будем обозначать таким же символом, как и сам вектор

$$v_1 = (v_1)_r, \quad v_2 = (v_2)_r, \quad E = E_r \quad (7)$$

Используя эти обозначения и выражение для дифференциального оператора  $\vec{\nabla}$  в цилиндрической системе координат, приведём систему (3)-(6) к следующему виду

$$\frac{\partial \rho_1^0 \alpha_1}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho_1^0 \alpha_1 r v_1)}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_2^0 \alpha_2}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho_2^0 \alpha_2 r v_2)}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

$$\rho_1^0 \alpha_1 \left( \frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial r} \right) = -\alpha_1 \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\varepsilon - 1}{8\pi} \frac{\partial E^2}{\partial r} - K \alpha_1 \alpha_2 (v_1 - v_2) \quad (10)$$

$$\rho_2^0 \alpha_2 \left( \frac{\partial v_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) = -\alpha_2 \frac{\partial P}{\partial r} + K \alpha_1 \alpha_2 (v_1 - v_2) \quad (11)$$

Мы можем обезразмерить данные уравнения, осуществив следующие замены:

$$r \rightarrow r \cdot r^*, \quad t \rightarrow t \cdot t^*, \quad (12)$$

$$\rho_{1,2}^0 \rightarrow \rho_{1,2}^0 \cdot \rho^*, \quad v_{1,2} \rightarrow v_{1,2} \cdot v^*, \quad P \rightarrow P \cdot P^*, \quad (13)$$

$$E \rightarrow E \cdot E^*, \quad K \rightarrow K \cdot K^*, \quad (14)$$

где величины со звёздочками — нормировочные масштабы обезразмеривания, которые удобно выбрать характерными для задачи величинами.

Задаем связь между нормировочными масштабами обезразмеривания в виде:

$$r^* = v^* t^*, \quad P^* = \rho^* (v^*)^2, \quad E^* = v^* \sqrt{M_1 \rho^*}, \quad K^* = M_2 \rho^* / t^*, \quad (15)$$

где  $M_1, M_2$  — безразмерные константы.

В дальнейшем будем считать, что уравнения (8)-(11) справедливы для обезразмеренных величин, сохраняя для них обычные обозначения.

В рассматриваемой задаче объёмная доля водной компоненты мала, по сравнению с воздушной:

$$\alpha_1 \ll \alpha_2 \quad (16)$$

По этой же причине мы считаем, что всё давление создаётся воздухом

$$p_1 \ll p_2, \quad P \approx p_2 \quad (17)$$

В начальный момент электрическое поле выключено,  $E = 0$ , а фазы находятся в покое,  $v_1 = v_2 = 0$ . Как мы увидим, при действующих значениях электрического поля результирующие скорости водной и воздушной компонент будут много меньше скорости звука  $v_{1,2} \ll c$ , а потому мы можем принять условие постоянства удельных плотностей

$$\rho_{1,2}^0 = const \quad (18)$$

В этом случае уравнения (8), (9) сводятся к

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\alpha_1 r v_1)}{\partial r} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\alpha_2 r v_2)}{\partial r} = 0 \quad (20)$$

Складывая эти уравнения, получим

$$\frac{\partial((\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2)r)}{\partial r} = 0, \Rightarrow \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 = C1 \quad (21)$$

где  $C1$  – некоторая постоянная величина.

Используя то, что скорости на бесконечности обращаются в ноль, получим, что  $C1 = 0$ , а значит

$$v_2 = -\frac{\alpha_1}{\alpha_2} v_1 \quad (22)$$

Вместе с условием (16) это подразумевает, что  $v_2 \ll v_1$ . Тогда

$$\rho_1^0 \alpha_1 \left( \frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial r} \right) = \frac{\varepsilon - 1}{8\pi} \frac{\partial E^2}{\partial r} - K \alpha_1 v_1 \quad (23)$$

Таким образом, условие баротропности фаз и приближение постоянства удельных плотностей позволили нам исключить параметры, относящиеся к воздушной компоненте. Диэлектрическую проницаемость водной компоненты в уравнении (23) определяем формулой для диэлектрической проницаемости полярных газообразных диэлектриков (Сивухин, 1977)

$$\varepsilon = 1 + \frac{4\pi n p_0^2}{3kT} \quad (24)$$

где  $n$  — концентрация молекул воды

$k$  — постоянная Больцмана,

$T$  — абсолютная температура

$p_0$  - дипольный момент молекулы воды,  $p_0 \approx 6 \times 10^{-30}$  Кл·м

Электрическое поле цилиндрического конденсатора обратно пропорционально расстоянию

$$E = \frac{c}{r} \quad (25)$$

где  $c$  — некоторая константа, связанная с разностью потенциалов следующим образом

$$U = \int_{r_1}^{r_2} dr \frac{c}{r} \Rightarrow c = \frac{U}{\ln(R_2/R_1)}, \quad (26)$$

где  $U$  — подаваемое напряжение,  $U \approx 5 \times 10^4$  В,

$R_1$  — радиус внутреннего электрода,  $r_1 \approx 2$  см,

$R_2$  — радиус внешнего электрода  $r_2 \approx 65$  см

(при этих значениях  $c \approx 1,5 \times 10^4$  В)

Таким образом,

$$\frac{\varepsilon - 1}{8\pi} \frac{\partial E^2}{\partial r} = \alpha_1 \rho_1^0 \frac{p_0^2}{6m_0 k T r^3}, \quad (27)$$

где  $m_0$  — масса молекулы воды,  $m_0 \approx 3 \times 10^{-26}$  кг.

Теперь наше основное уравнение (23) можно записать следующим образом

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial r} = -\frac{A}{r^3} - S v_1 \quad (28)$$

где введены обозначения

$A = \frac{c^2 p_0^2}{3 m_0 k T}$  — константа, характеризующая силу электрического поля,  $A \sim 10^{-4} \text{ м}^4/\text{с}^2$ ,

$S = K/\rho_1^0$  — константа, характеризующая силу взаимодействия,  $S \sim 10^4 \text{ с}^{-1}$ .

Удобно переписать уравнение (28) в лагранжевой форме

$$\frac{d^2 r_1}{dt^2} + S \frac{dr_1}{dt} + \frac{A}{r_1^3} = 0 \quad (29)$$

Уравнение (29) представляет из себя обыкновенное дифференциальное уравнение, которое относительно просто анализировать.

### Расчёты. Аналитическое решение и численный анализ

В пренебрежении силой взаимодействия, т.е. при  $S = 0$  уравнение (29) можно решить аналитически

$$r(t) = r_0 \sqrt{1 - \frac{At^2}{r_0^4}} \quad (30)$$

где  $r_0$  — первоначальное расстояние до оси внутреннего электрода.

Из формулы (30) можно оценить время падения водной компоненты на электрод, в зависимости от первоначального расстояния  $r_0$

$$t(r_0) = \frac{r_0^2}{\sqrt{A}} \quad (31)$$

Для значения  $A = 10^{-4} \text{ м}^4/\text{с}^2$  в пренебрежении  $S$  вся водная компонента должна притянуться к электроду за время порядка 50 с, но основное ее количество резко снижается на расстоянии  $r < 0,2 \text{ м}$ .

На рис. 1—4 представлены результаты анализа воздействия неоднородного электрического поля электрически заряженного цилиндрического электрода на туман при условии пренебрежения силами взаимодействия  $S = 0$ .

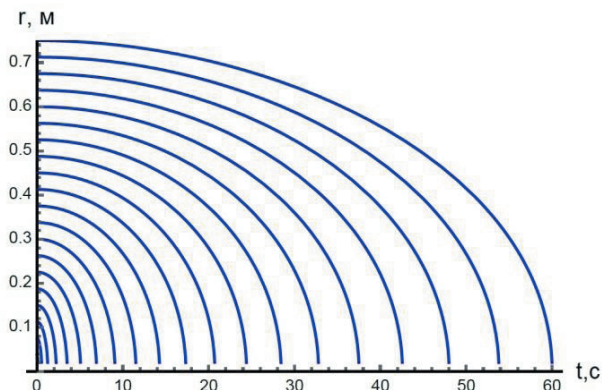


Рис. 1. Траектории движения водной компоненты относительно электрически заряженного электрода.

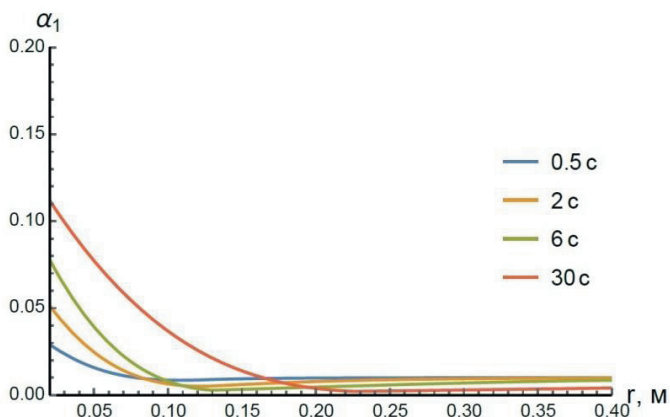


Рис. 2. Изменение концентрации водной компоненты в пространстве вокруг электрически заряженного электрода.



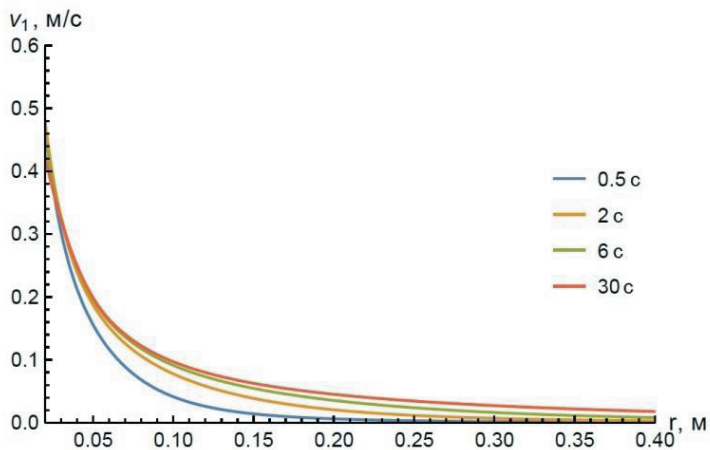


Рис. 3. Изменение скорости движения водной компоненты в пространстве вокруг электрически заряженного электрода.

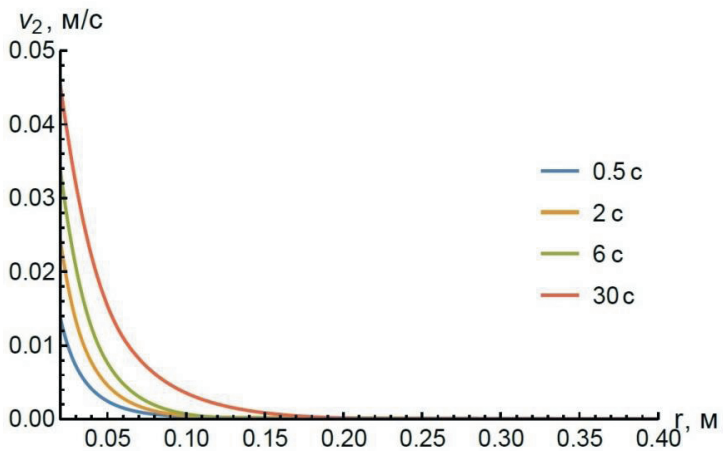


Рис. 4. . Изменение скорости движения сухого воздуха в пространстве вокруг электрически заряженного электрода.

При ненулевом значении параметра  $S$  аналитическое решение уравнения (29) найти не удаётся, но можно найти численные решения.

Анализ численных решений показал, что даже при сильных вариациях параметров в различные моменты времени профили скоростей отличаются незначительно. Это связано с тем, что значение скорости на расстоянии  $r$  зависит в первую очередь от потенциальной энергии, которую имело тело в начальный момент своего движения. В нашей задаче эффективная потенциальная энергия очень быстро убывает с расстоянием (обратно пропорционально квадрату  $r$ ), а потому для всех достаточно далёких точек ( $r \geq 0,2$  м) её можно считать равной нулю. Отсюда примерное равенство кинетических энергий при одинаковых расстояниях до оси цилиндрического электрода, и слабая зависимость поля скоростей от времени при заданных параметрах.

### Краевые эффекты

В математической модели ранее было введено упрощающее предположение о точной цилиндрической симметрии. В настоящем разделе мы оценим вклад и выясним возможную роль краевых эффектов.

Для того, чтобы найти потенциал поля  $\phi$ , нужно решить уравнение Лапласа (32) с заданными граничными условиями:  $\phi = U$  на внутреннем электроде,  $\phi = 0$  на внешнем электроде.

$$\Delta\phi = 0 \quad (32)$$

В цилиндрической системе координат с учётом угловой симметрии уравнение Лапласа принимает следующий вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (33)$$

Численное решение данного уравнения приводит к следующему распределению величины потенциала (рис. 5).

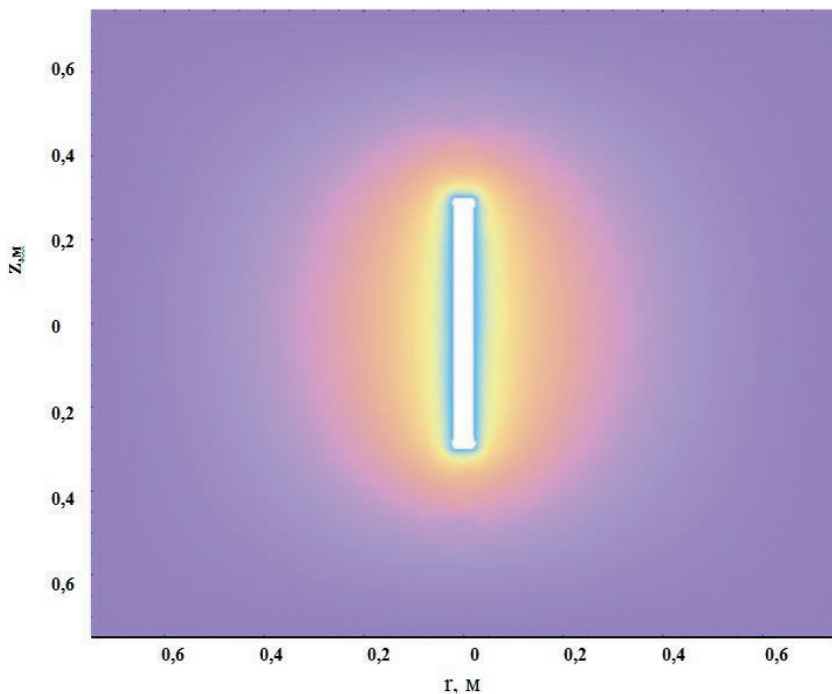


Рис. 5. Потенциал цилиндрического электрода.

Найдя потенциал, мы можем вычислить напряжённость электрического поля по формуле

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi \quad (34)$$

Сила Гельмгольца (2) пропорциональна градиенту квадрата напряжённости электрического поля, и спадает ещё быстрее – обратно пропорционально кубу расстояния до оси цилиндра. Для наглядности, изобразим картину рассчитанных силовых линий в непосредственной окрестности одного из краёв цилиндра

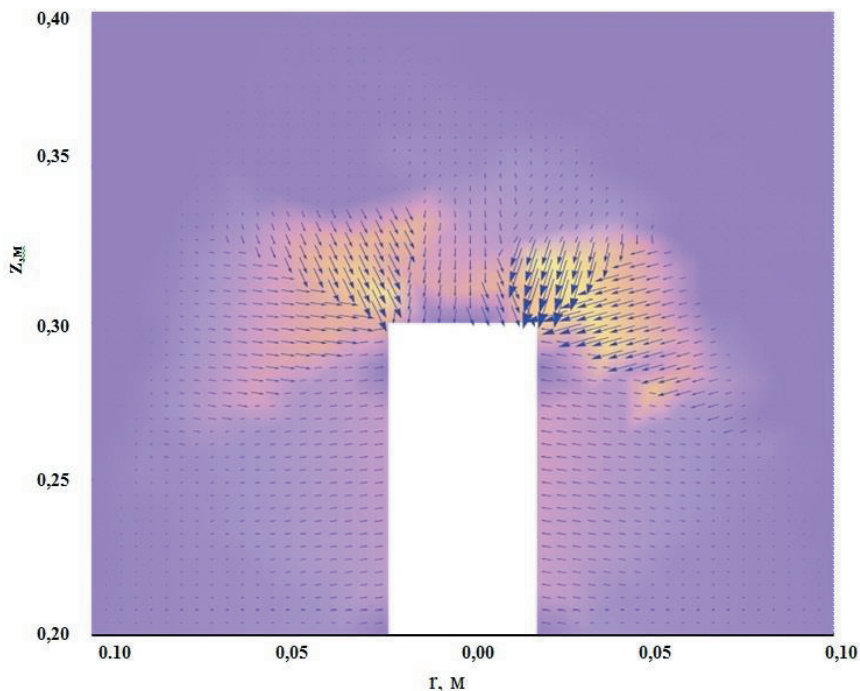


Рис. 6. Нормированная сила Гельмгольца вблизи торца цилиндра.

Как следует из расчетов, как само электрическое поле, так и сила Гельмгольца у краёв цилиндра (рис. 6) значительно превышают значения, получаемые в пренебрежении краевыми эффектами. Эти поправки имеют значение только в непосредственной близости электрода и, в общем, не сказываются на динамике тумана во всей камере.

## Выводы

1. Неоднородное электрическое поле оказывает существенное влияние на динамику аэрозольных частиц, а их ускоренное движение приводит к рассеиванию тумана.

2. С помощью разработанной математической модели получены следующие оценки: вся водная компонента, окружающая электрод радиусом 2 см, установленный по оси аэрозольной камеры шириной 1,3 м, должна притянуться к нему в течение  $\sim 1$  мин сформированным вокруг него неоднородным электрическим полем при подаче на электрод напряжения 50 кВ.

3. Результаты расчетов согласуются с результатами предварительных экспериментальных исследований. Процесс естественного рассеивания тумана в аэрозольной камере длился от десяти минут до получаса. При подаче напряжения на электрод с радиусом 2 см, находящийся в центре камеры, через 5—10 с наблюдалось заметное просветление тумана, и в течение 1—2 мин туман полностью рассеивался. Рассеяние тумана происходило тем быстрее, чем больше подаваемое напряжение.

4. Электрическое поле и сила Гельмгольца у краёв цилиндрического электрода значительно превышают значения, полученные без учета краевых эффектов. Однако поправки на краевой эффект имеют существенное значение только в непосредственной близости электрода и, в общем, не сказываются на динамике тумана во всей камере.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проекты №№ 14-08-00836, 15-0810081, 15-08-04724*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Качурин Л. Г.* (1990). Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеиздат. 463 с.

*Латишин В. Б., Яблоков М. Ю., Палей А. А.* (2002). О давлении пара над заряженной каплей. // Журнал физической химии. Том 76. № 10. С. 1901—1903.

*Михайленко К. И., Валеева Ю. Р.* (2013). Моделирование осаждения мелкодисперсной взвеси из воздуха при прохождении волн давления // Вычислительные методы и программирование. Т. 14. С. 328—333.

*Палей А. А., Латишин В. Б., Жохова Н. В., Москаленк В. В.* (2007). Исследование процессов конденсации паров на электрически заряженных аэрозольных частицах

//Электронный научный журнал «Исследовано в России»-<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>.

*Никандров В. Я.* (1959). Искусственные воздействия на облака и туманы. — Л.: Гидрометеоиздат. 192 с.

*Нигматулин Р. И.* (1987). Динамика многофазных сред.— М.: Наука. 464 с.

*Сивухин Д. В.* (1977). Общий курс физики. Электричество. Том III. — М.: Наука. 704 с.

*Толтыгин Л. И. и др.* (2014). О перспективах очистки воздуха от аэрозольных частиц посредством неоднородного электрического поля // Экология и промышленность России. № 10. С. 48—51.

*Borisov Y. A.* Status and development of investigation on fog dispersion in Russia. [http://jcsepa.mri-jma.go.jp/outreach/20110303/abstract/Fog\\_Japan\\_Y\\_Borisov.pdf](http://jcsepa.mri-jma.go.jp/outreach/20110303/abstract/Fog_Japan_Y_Borisov.pdf)

*Frost W., Collins F. G., Koepf D.* (1981). Charged particle concepts for fog dispersion. – National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch. T. 3440.

*Williams G.* (1996). Flying through fire. Fido - The Fogbuster of World War Two. — UK London: Grange Books. 228 p.

*Lapshin V. B., Paley A. A., Balyshev A. V., Boldyrev I. A., Dubtsov S. N., Tolpygin L. I.* (2011). Evolution of nanometer-size aerosol in dry and humid environment under the influence of corona discharge. // Atmospheric and oceanic optics. V. 24. №. 11. P. 997—1001. (<http://ao.iao.ru/en/content/vol.24-2011/iss.11/12>).

*Paley A.A., Romanov N. P.* (2013). A Construction and Characteristics of a Fog Droplet Collector made with the Use of a Corona Discharge»// The Sixth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. —Yokohama, Japan. P.19

*Parker K. R. (ed.).* (2012). Applied electrostatic precipitation. – Springer Science & Business Media. 521 p.

## **ОЦЕНКА УРОВНЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ У АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ И ЛЭП В СРАВНЕНИИ С ФОНОВЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ЕСТЕСТВЕННОЙ АТМОСФЕРЫ**

*М. А. Васильева<sup>1</sup>, С. Н. Дубцов<sup>2</sup>, Н. В. Жохова<sup>1</sup>, А. А. Палей<sup>3</sup>,  
Ю. В. Писанко<sup>3</sup>, Л. И. Толтыгин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Государственный океанографический институт,  
119034 Москва, Кропоткинский пер., д. 6.  
e-mail: goin@bk.ru

<sup>2</sup> Институт химической кинетики и горения СО РАН,  
630090 Новосибирск, ул. Институтская, 3

<sup>3</sup> Институт прикладной геофизики,  
129128 Москва, ул. Ростокинская, 9

Поступила в редакцию 20.12.2015  
Поступила после доработки 29.01.2016

Основным показателем аэрозольного загрязнения воздуха на сегодняшний день является массовое содержание аэрозоля в единице объема воздуха (Арктический СНИП, 2003). Можно отметить, что, благодаря действенным мерам по повышению чистоты воздуха, в целом, удалось добиться существенного сокращения этого показателя.

Вместе с тем, в научной литературе (Zhu et al, 2002; Asmi et al, 2011) все большее значение придается показателю «численная концентрация аэрозольных частиц».

На рис. 1 представлено статистическое распределение аэрозольных частиц по количеству, площади и их массе в зависимости от их размера. Как видно из представленного рисунка, массовое содержание аэрозольных частиц в основном (более 70 %) определяется крупными частицами, более 1 мкм, в то время как их численная концентрация составляет менее 0,01 % от концентрации всех аэрозолей. Основной вклад (более 99,9 %) в значение численной

концентрации частиц вносят субмикронные частицы, размером менее 1 мкм. Порядка 80 % частиц имеют размер не более 100 нм, так называемые (ultrafine particle).

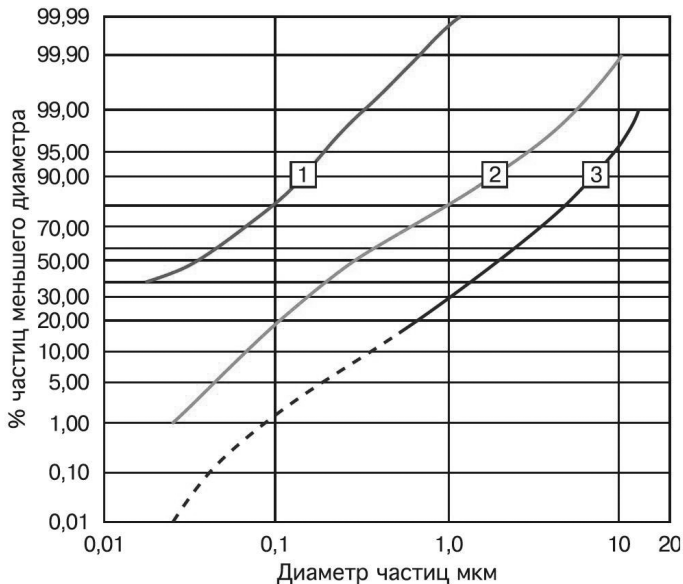


Рис. 1. Статистическое распределение аэрозольных частиц по количеству (1), площади (2) и их массе (3) в зависимости от их размера (Арктический СНИП, 2003).

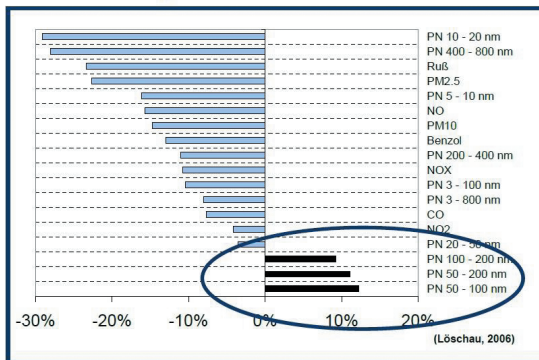
На рис. 2 представлены обобщающие материалы наблюдений, производимых на 4-х станциях в Европе. Как видно из рисунка, во всем диапазоне размеров аэрозолей, кроме диапазона 50—200 нм, отмечается сокращение численной концентрации аэрозоля за выбранный период времени. Так для аэрозолей PM2.5 сокращение составляет примерно 25 %, а для аэрозолей PM10, соответственно 15 %. Наблюдаемое увеличение аэрозольного загрязнения связывают с увеличением загрязнения воздуха аэрозольными частицами от автомобильного транспорта. Доля транспорта в общем загрязнении



атмосферы частицами диапазона размеров от 13 до 800 нм оценивается в 65 % (Peu et al., 2009). Это, прежде всего, сажевые частицы, содержащиеся в выхлопных газах дизельных двигателей, а также частицы от истирания шин, тормозных колодок и частицы истираемого асфальта.

## Past Particle measurements in Dresden – particle number distributions

Change of PN-concentrations from 8/2002 to 8/2005



- higher Particle conc.  
**50 – 200 nm**
- higher share  
of **diesel-cars**  
(30% now)
- maximum number  
of **diesel soot** at  
diameter **60-100 nm**



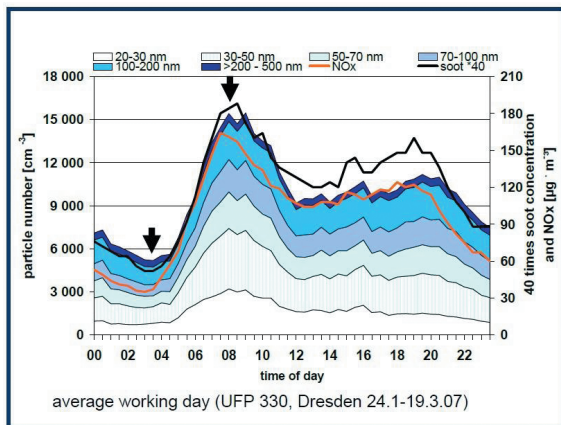
10-Sep-2007

Рис. 2. Изменение численной концентрации аэрозольных частиц за трехлетний период наблюдения сетью UNIPOLNET ([http://www.tsi.com/uploadedFiles/\\_Site\\_Root/Products/Literature/Posters/UFIPOLNET\\_EAC07\\_gerwig\\_lecture.pdf](http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Posters/UFIPOLNET_EAC07_gerwig_lecture.pdf))

Для российских дорог дополнительным источником аэрозольного загрязнения является дорожная пыль, которая образуется вследствие традиционно принятой технологии строительства дорог. Дорожное полотно формируется на самом нижнем уровне, ниже уровня газонов.

Устройство, обеспечивающих эффективный отвод с дорожного полотна воды, а также устройств, исключающих попадания на дорожное полотно, стекающих с газонов селевых потоков, не предусмотрено. Во время выпадения осадков грязевые потоки с газонов устремляются на дорожное полотно. После высыхания осевшие на полотно загрязнения размалываются шинами проходящих машин и превращаются в мелкодисперсную пыль.

Как отмечается в итоговом докладе комиссии по мониторингу аэрозольного загрязнения сети UNIPOLNET, концентрация аэрозольных частиц от 20 до 500 нм коррелирует с концентрацией оксидов азота и сажи в воздухе. Это подтверждает предположение, что основным источником аэрозольного загрязнения в отмеченном диапазоне является автомобильный транспорт. На рис. 3 представлена зависимость концентрации аэрозольных частиц диапазона от 20 до 500 нм, полученная сетью наблюдения UNIPOLNET в рабочий день.



**Particle size distributions 20 – 500 nm**

- Average working day:
  - Minimum 3:00 h
  - Maximum 8:00 h
- particle number concentration during average weekday shows **similar pattern like NOx and soot**

Рис.3. Данные сети UFIPOLNET по концентрации аэрозольных частиц размером от 20 до 500 нм, сажи и окислов азота.

Область загрязнения аэрозольными частицами от автомобильных дорог может распространяться на расстояние порядка 300 метров по

направлению ветра (рис. 4). Есть сведения, что люди, живущие вблизи автомобильных дорог, значительно чаще подвержены раковым заболеваниям (Азаров и др., 2012).

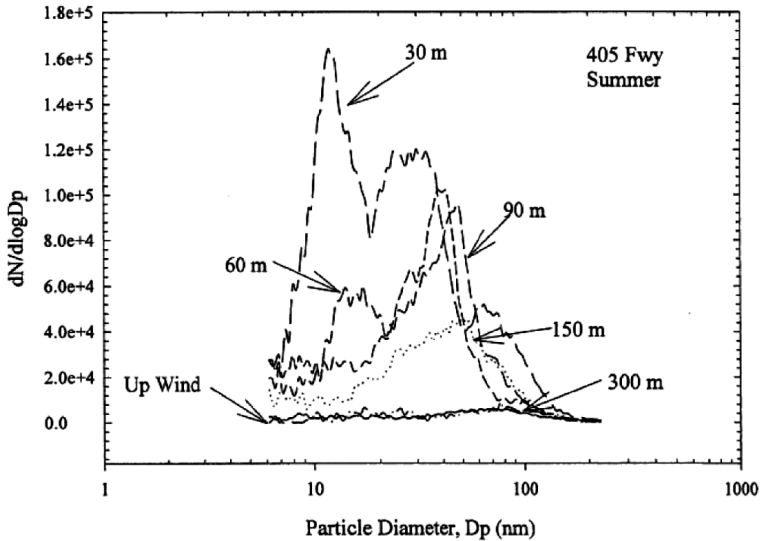


Рис. 4. Экспериментальные данные по распределению аэрозольных частиц у дороги (Demerjian et al, 2008).

Увеличение концентрации субмикронных частиц наблюдается и в местах, где происходят электрические разряды (Толпыгин и др., 2014; Савченко, Уваров, 1988; Jennings, Jones, 1977). Увеличение концентрации субмикронных частиц вызвано повышением концентрации ионов (Лапшин и др., 2011).

Для подтверждения существенного влияния электрических разрядов на аэрозольное загрязнение атмосферы были проведены полевые исследования концентрации аэрозольных частиц вблизи ЛЭП — трассы А-308 в Талдомском районе Московской области. На рис. 5 представлен общий вид местности проведения исследований, а на рис. 6 — схема местности проведения эксперимента.



Рис. 5. Общий вид местности проведения исследований концентрации аэрозольных частиц у линии ЛЭП.

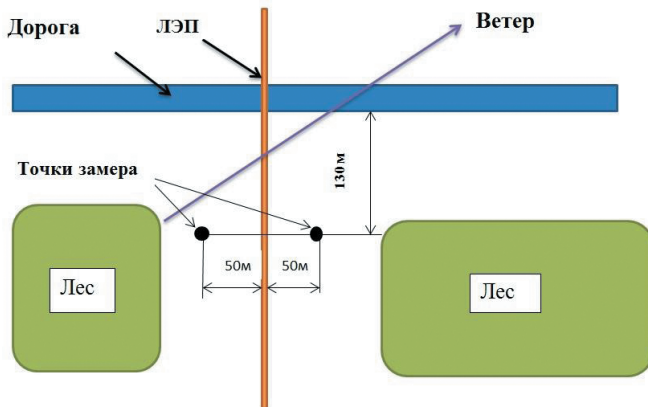


Рис. 6. Схема проведения эксперимента.

Работы проводились с наветренной стороны от автомобильной дороги в двух разнесенных на 100 м друг от друга точках, находящихся на удалении 130 метров от дороги. Угол между направлением ветра и дорогой в течение всего времени проведения исследований измерялся закрепленным на флагштоке ветроуказателем и составлял от 20 до 60 градусов. Наблюдения производились с помощью измерителя скорости движения воздуха, относительной влажности и температуры ТКА-ПКМ-60. Скорость ветрового потока изменялась от 1 м/сек до 4 м/сек, температура воздуха от 18 °С до 22 °С, влажность воздуха — от 78 % до 73 %. Фоновая концентрация аэрозольных частиц определялась в 50 м от линии ЛЭП с наветренной стороны, а концентрации аэрозольных частиц, образующихся в атмосфере вследствие воздействия ЛЭП, в 50 м от линии ЛЭП с подветренной стороны.

Концентрация аэрозольных частиц и их распределение по размерам измерялась диффузионным спектрометром аэрозолей (ДСА), изготовленным Институтом химической кинетики и горения СО РАН. Прибор позволяет производить замер концентрации частиц от 5 до  $2 \cdot 10^6$  частиц/см<sup>3</sup> (без разбавителя) в диапазоне размеров 3—200 нм с точностью 15 % (Ankilov et al. 2002).

Для исключения влияния случайных факторов на результаты эксперимента замеры производились с наветренной и подветренной от ЛЭП стороны попеременно. В течение часа замерялась фоновая концентрация аэрозолей с наветренной от ЛЭП стороны. Затем в течение 2 часов замерялась концентрация аэрозолей с подветренной от линии ЛЭП стороны, далее в течение часа замерялась фоновая концентрация. В заключении в течение часа замерялась концентрация аэрозолей с подветренной от линии ЛЭП стороны. Таким образом, оценка влияния ЛЭП на аэрозольное загрязнение осуществлялась по результатам 4-х часового наблюдения за фоновым аэрозольным загрязнением (30 замеров) и 4-х часового наблюдения за аэрозольным загрязнением с подветренной от линии ЛЭП стороны (45 замеров). Анализ данных измерений ДСА по каналам показывает, что в некоторых измерениях концентрация наночастиц с подветренной от

линии ЛЭП стороны превышает  $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . В отдельных случаях концентрация аэрозольных частиц составляла  $\sim 10^5$  частиц/см<sup>3</sup>, что практически на 2 порядка превышает значение фоновой концентрации. Распределение частиц по размерам с подветренной стороны принципиально отличается от всех измерений фоновой концентрации. Основная доля частиц — в диапазоне 10—30 нм, а при очень высокой концентрации — около 3 нм, что свидетельствует о том, что источник этих частиц расположен вблизи точки измерения. Эти частицы могли образоваться при конденсации пересыщенных паров нелетучих соединений в результате химических реакций при повышенной концентрации электрических зарядов (Yu, 2010). Типичные нормированные распределения зарегистрированных частиц приведены на рис. 7.

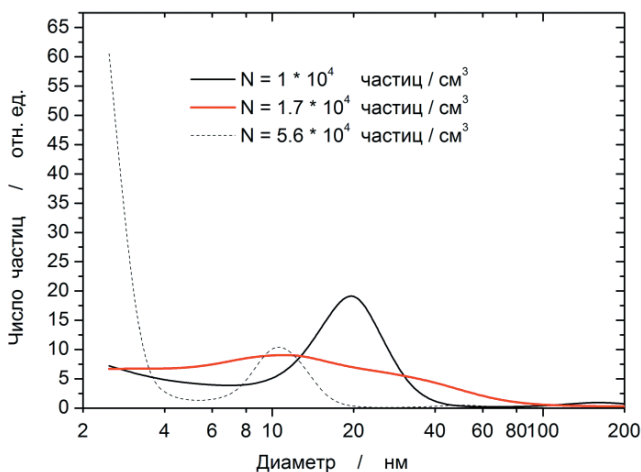


Рис. 7. Распределение частиц по размерам в зависимости от концентрации частиц (в 50 метрах от ЛЭП по направлению ветра).

Обобщенные результаты суммарных данных всех измерений, представленные на рис. 8, показывают, что в 50-метровой зоне по ветру от ЛЭП спектр частиц характеризуется тремя максимумами:

30 нм, 10 нм, и менее 2 нм. Суммарная концентрация аэрозольных частиц размером менее 100 нм практически на порядок превышает фоновое значение.

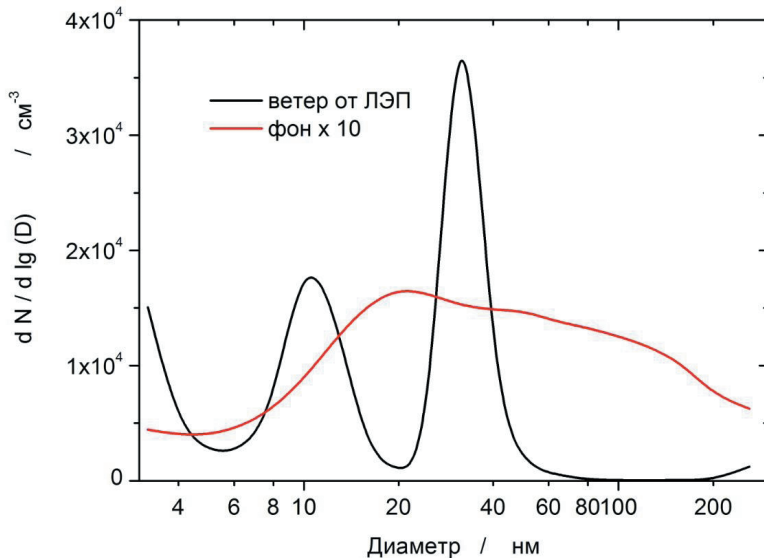


Рис. 8. Спектр аэрозольных частиц в воздухе в 50 метрах от ЛЭП по направлению ветра.

Концентрация аэрозольных частиц:  
 с подветренной стороны от ЛЭП —  $8,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ,  
 с наветренной стороны от ЛЭП —  $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ .

Результаты проведённого натурального эксперимента показывают, что область воздушного пространства, прилегающего к ЛЭП, характеризуется существенным повышением концентрации аэрозольных частиц нанометрового размера (менее 100 нм).

Исходя из анализа опубликованной научной литературы, можно заключить, что повышение в атмосфере концентрации аэрозольных частиц может быть вызвано повышением концентрации ионов. Роль этого механизма требует дальнейших исследований на фоне повышения концентрации аэрозольных частиц в диапазоне размеров

50—200 нм, которую в настоящее время связывают с увеличением аэрозольного загрязнения от автомобильных дорог.

Необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на выявление механизма формирования аэрозольных частиц в условиях повышенной концентрации электрических зарядов в различных гидрометеорологических условиях и влияния ЛЭП на аэрозольное загрязнение атмосферы.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ: проекты №№ 14-08-00836, 15-0810081, 15-08-04724*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арктический СНИП (2003). №2 (14) [http://www.ochistitel.ru/img/pur/arktika\\_2\\_2003.pdf](http://www.ochistitel.ru/img/pur/arktika_2_2003.pdf).

*Азаров В. К., Кутенев В. Ф., Степанов В. В.* (2012). О выбросе твердых частиц автомобильным транспортом // *Экология*. № 6 (77). С. 55—58.

*Латишин В. Б., Палей А. А., Бальшеев А. В., Болдырев И. А., Дубцов С. Н., Толтыгин Л. И.* (2011). Эволюция аэрозолей нанометрового диапазона в сухой и увлажненной газовой среде при воздействии коронного разряда // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 23. № 11. С. 997—1001.

*Савченко А. В., Уваров А. Д.* (1988). Моделирование влияния выбросов ТЭЦ на электрическое состояние атмосферы // В сб. Труды III Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. — Л.: Гидрометеиздат. С. 70—73.

*Толтыгин Л. И. и др.* (2014). О перспективах возможности очистки воздуха от аэрозольных частиц посредством неоднородного электрического поля // *Экология и промышленность России*. № 10. С. 48—51.

*Ankilov A., Baklanov A., Colhoun M., Enderle K.-H., Gras J., Julanov Yu., Kaller D., Lindner A., Lushnikov A. A., Mavliev R., McGovern F., Mirme A., T.C. O'Connor, Podzimek J., Preining O., Reischl G. P., Rudolf R., Sem G. J., Szymanski W. W., Tamm E., Vrtala A. E., Wagner P. E., Winklmayr W., Zagaynov V.* (2002). Intercomparison of number concentration measurements by various aerosol particle counters // *Atmospheric Research*. V. 62. P. 177—207.

*Asmi A. et al.* (2011). Submicron particles in Europe 2008—2009 // *Atmos. Chem. Phys.* 11. P. 5505—5538.



*Demerjian K. L., Mohnen V. A. (2008). Synopsis of the Temporal Variation of Particulate Matter Composition and Size // Journal of the Air & Waste Management Association. 58. P. 216—233. DOI:10.3155/1047-3289.58.2.216*

*Fangqun Yu. (2010). Ion-mediated nucleation in the atmosphere: Key controlling parameters, implications, and look-up table.// Journal of geophysical research. Vol. 115. DO3206, doi:10.1029/2009jd012630, 2010*

*Jennings S., Jones C. (1977). High electric fields from industrial stack plumes // Nature. Vol. 264. № 5583. P. 236—237.*

*Pey J., Querol X., Alastueya A., Rodriguez S., Putaud J. P., Van Dingenen R. (2009). Source apportionment of urban fine and ultra-fine particle number concentration in a Western Mediterranean city // Atmospheric Environment. 43 (2009). P. 4407—4415. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.05.024.*

UNIPOLNET (Ultrafine particle size distributions in air pollution monitoring networks). [http://www.tsi.com/uploadedFiles/\\_Site\\_Root/Products/Literature/Posters/UFIPOLNET\\_EAC07\\_gerwig\\_lecture.pdf](http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Posters/UFIPOLNET_EAC07_gerwig_lecture.pdf)

*Zhu Y., Hinds W. C., Kim S., Sioutas C. (2002). Concentration and Size Distribution of Ultrafine Particles Near a Major Highway// Journal of the Air & Waste Management Association. 52. P. 1032—1042.*

**ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПО АКТИНОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

*В. В. Стадник, И. Н. Шанина*

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

Поступила в редакцию 07.12.2015  
Поступила после доработки 22.01.2016

Естественная освещенность земной поверхности является одним из параметров влияющих на жизнедеятельность человека.

Данные о дневной естественной освещенности необходимы для целого ряда отраслей экономики: в энергетике — для определения и прогнозирования электропотребления, ЖКХ, строительстве, обеспечении работы транспорта и т. п.

Влияние освещенности более всего заметно для бытовых потребителей, а также на предприятиях с высокими требованиями к освещенности рабочих мест. Данные освещенности необходимы также для разработки и реализации проектов современного архитектурного строительства и дизайна, которые предъявляют высокие требования к освещенности сооружений.

В настоящее время на сети актинометрических станций не производятся регулярные наблюдения над естественной освещенностью. Единственный пункт, где проводятся регулярные наблюдения над естественной освещенностью начиная с 1964 г. и по настоящее время, то есть более 40 лет это Метеорологическая Обсерватория МГУ (Москва). В связи с этим большое значение приобретают косвенные методы получения средних значений освещенности по данным стандартных актинометрических и метеорологических наблюдений.

В 1960—70 гг. в СССР было опубликовано достаточно большое количество различных работ, посвященных исследованиям светового режима того или иного района (Бартенева, 1967; Бартенева, Полякова, 1966; Бартенева, Полякова, Русин, 1971). Однако имеющиеся к тому времени наблюдения над освещенностью в естественных условиях, как в СССР, так и за рубежом, носили, в основном, эпизодический характер и их было недостаточно для получения надежных закономерностей изменения величины освещенности в зависимости от условий наблюдения. В СССР систематические наблюдения за естественной освещенностью проводились в то время только на трех станциях (Иркутск, Ташкент, Павловск).

В. В. Шароновым (1945) были опубликованы таблицы естественной освещенности горизонтальной поверхности, построенные на основании многолетнего ряда наблюдений за освещенностью в Павловске. В таблицах приводятся значения дневной освещенности горизонтальной поверхности в зависимости от высоты Солнца и облачности. Эти таблицы и в настоящее время имеют большое практическое значение, несмотря на то, что они построены по данным одной станции.

Существенным вкладом в исследования естественной освещенности явились работы О. Д. Бартеневой, Е. А. Поляковой и Н. П. Русина (1971). Ими была разработана методика расчета освещенности горизонтальной поверхности по данным актинометрических наблюдений с использованием светового эквивалента и приведено распределение естественной освещенности по территории СССР. Основные результаты этих исследований опубликованы в монографии «Режим естественной освещенности на территории СССР».

Световым эквивалентом солнечной радиации  $K$  принято называть отношение величины освещенности в тысячах люксов к одновременному значению интенсивности радиации в (тыс. лк/кал·см<sup>2</sup>/мин). Исследования показали, что световой эквивалент мало меняется в пространстве, но существенно зависит от высоты Солнца над горизонтом и условий облачности.

Многочисленные измерения светового эквивалента радиации, проведенные в различных пунктах, подтвердили, что одним и тем же значением светового эквивалента радиации можно пользоваться для разных географических пунктов для данного вида радиации, данной высоты Солнца и облачности (состояния диска Солнца).

Как известно, естественная освещенность определяется астрофизическими и геофизическими факторами.

К астрофизическим факторам, определяющим естественную освещенность, относится положение Солнца на небосводе, которое имеет годовой и суточный ход, подчиняется строгим математическим законам и вычисляется с любой заданной точностью.

К геофизическим факторам относятся облачность (количество облаков на небосводе и их форма), прозрачность атмосферы и альbedo подстилающей поверхности). Все эти факторы постоянно и хаотично меняются в пространстве и во времени, поэтому их учет представляет основную проблему при расчетах естественной освещенности.

В работах (Бартенева, 1967; Бартенева, Полякова, 1966; Бартенева, Полякова, Русин, 1971) рассматривалось влияние на освещенность высоты Солнца, облачности, прозрачности атмосферы и свойств подстилающей поверхности. Однако вопросам зависимости суммарной естественной освещенности от величины альbedo подстилающей поверхности уделялось недостаточно внимания. Только в таблицах В. В. Шаронова значения дневной освещенности представлены для разного состояния подстилающей поверхности — покрытой растительностью и для зимних условий.

Для одних и тех же условий облачности и одинаковой высоте солнца при снежном покрове освещенность будет существенно выше, чем при растительном. Это объясняется многократным отражением света от облаков и от земной поверхности, покрытой снегом.

В условиях безоблачного неба снежный покров оказывает большее влияние на величину освещенности при малых высотах Солнца, при облачном небе — при больших высотах.

Целью данной работы было выявление зависимости естественной освещенности от альbedo подстилающей поверхности.

Величина освещенности рассчитывалась с применением косвенных методов. Использовались два метода — один из них разработан в ГГО (Бартенева, Полякова, Русин, 1971), другой — в метеорологической обсерватории МГУ (Климатические ресурсы..., 2007).

Основу первого метода составляет пересчет интенсивности суммарной солнечной радиации в величины освещенности с помощью светового эквивалента. Метод МГУ предполагает расчет суммарной освещенности двумя способами — по продолжительности солнечного сияния и по суммарной радиации с использованием уточненного светового эквивалента.

Результаты расчета суммарной освещенности по методике МГУ (*Eq 1*) и ГГО из (Бартенева, Полякова, Русин, 1971) (*Eq 2*), а также различия между ними приведены таблице 1.

Как видно из таблицы, месячные значения суммарной освещенности, рассчитанные по методу ГГО, в среднем на 10 % ниже, чем по методу МГУ.

Для расчетов по методике ГГО использовались данные срочных наблюдений 15 актинометрических, расположенных на Европейской территории и одной станции Забайкалья (Чита) за 4 месяца (январь, апрель, июль, октябрь) за период с 2003—2008 гг.

Данные актинометрических наблюдений (при высоте солнца  $\geq 5^\circ$ ) были классифицированы по состоянию солнечного диска, независимо от количества облаков на небосводе:

1— диск Солнца с отметкой «4» (ясно) за каждый срок,

2 — диск Солнца с отметкой «0» (пасмурно) за каждый срок (в этом случае суммарная освещенность равна рассеянной освещенности).

Таблица 1  
 Месячные суммы суммарной освещенности, полученные по методу МГУ (Eq 1) и методу ГГО (Eq 2)  
 (Бартелева, Полякова, Русин, 1971) и относительная ошибка методов расчета (%)

Станция	Eq 1 (клк/час)										Eq 2 (клк/час)										Ошибка (%) (Eq 1-Eq 2)/Eq 1												
	Г	ІV	УІІ	Х	І	ІV	УІІ	Х	І	ІV	УІІ	Х	І	ІV	УІІ	Х	І	ІV	УІІ	Х	І	ІV	УІІ	Х									
Бугрино	496	11820	17112	1550	500	12167	16500	1500	4,6	3,6	3,2	12167	16500	1500	500	11833	16667	2000	-1	-0,1	6,3	12,8	12167	16500	1500	500	11833	16667	2000	-1	-0,1	6,3	12,8
Усть-Вымь	589	10140	17298	2728	333	9000	15000	2167	11,2	13,3	20,6	9000	15000	2167	333	12667	17000	3167	10	1,6	6,6	8,0	9000	15000	2167	333	12667	17000	3167	10	1,6	6,6	8,0
Санкт-Петербург	1302	12870	18197	3441	1167	12667	17000	3667	7,2	7,8	12,4	12667	17000	3667	1167	12667	17000	3667	14	7,2	7,8	12,4	12667	17000	3667	1167	12667	17000	3667	14	7,2	7,8	12,4
Ноллинск	1736	13650	18445	4185	1500	12667	17000	3667	0,4	1,6	8,9	12667	17000	3667	1500	12667	18000	3500	7	0,4	1,6	8,9	12667	17000	3667	1500	12667	18000	3500	7	0,4	1,6	8,9
Верхнее Дуброво	1612	12720	18290	3844	1500	12667	17000	3667	3,1	6,3	11,7	12667	18000	3500	1500	13167	17667	3667	8	3,1	6,3	11,7	12667	18000	3500	1500	13167	17667	3667	8	3,1	6,3	11,7
Кушнаренково	1984	13590	18848	4154	1833	10667	16833	5500	10,7	8,0	-0,2	13167	17667	3667	1833	10667	16833	5500	13	10,7	8,0	-0,2	13167	17667	3667	1833	10667	16833	5500	13	10,7	8,0	-0,2
Нижнедевицк	2480	11940	18290	5487	2167	10667	16833	5500	2,2	5,6	8,5	10667	16833	5500	2167	10667	16833	5500	3	2,2	5,6	8,5	10667	16833	5500	2167	10667	16833	5500	3	2,2	5,6	8,5
Ершов	2914	14490	20305	6014	2833	14167	19167	5500	8,5	8,3	7,5	14167	19167	5500	2833	14167	19167	5500	7	8,5	8,3	7,5	14167	19167	5500	2833	14167	19167	5500	7	8,5	8,3	7,5
Каменная Сель	2697	12750	18910	5766	2500	11667	17333	5333	3,0	8,7	11,9	11667	17333	5333	2500	11667	17333	5333	9	3,0	8,7	11,9	11667	17333	5333	2500	11667	17333	5333	9	3,0	8,7	11,9
Ростоши	2573	13230	19158	5487	2333	12833	17500	4833	8,8	10,3	12,6	12833	17500	4833	2333	12833	17500	4833	11	8,8	10,3	12,6	12833	17500	4833	2333	12833	17500	4833	11	8,8	10,3	12,6
Цимлянск	3007	14070	21731	7626	2667	12833	19500	6667	3,8	4,8	8,4	12833	19500	6667	2667	12833	19500	6667	2	3,8	4,8	8,4	12833	19500	6667	2667	12833	19500	6667	2	3,8	4,8	8,4
Волгоград	2728	14040	21173	7099	2667	13500	20167	6500	12,1	12,3	10,1	13500	20167	6500	2667	13500	20167	6500	12	12,1	12,3	10,1	13500	20167	6500	2667	13500	20167	6500	12	12,1	12,3	10,1
Гигант	3410	14220	21855	8339	3000	12500	19167	7500	13,3	5,1	14,7	12500	19167	7500	3000	12500	19167	7500	5	13,3	5,1	14,7	12500	19167	7500	3000	12500	19167	7500	5	13,3	5,1	14,7
Соци	3844	13260	21421	9579	3667	11500	20333	8167				11500	20333	8167	3667	11500	20333	8167					11500	20333	8167	3667	11500	20333	8167				

Таблица 2

**Средние дневные и месячные суммы суммарной освещенности  
при отметке диска Солнца «0» (пасмурно), клк**

Станции	I	IV	VII	X	I	IV	VII	X
	<i>Средние дневные суммы суммарной освещенности</i>				<i>Месячные суммы суммарной освещенности</i>			
Верхнее Дуброво	2184	10245	13516	4137	67702	307345	418982	12823
Санкт- Петербург	1067	8898	13539	3115	33073	266934	419705	96578
Архангельск		8674	11612	1878		260214	359979	58229
Чита	3758	13746	16449	6638	116505	412370	509908	205776
Цимлянск	3529	11462	14026	6460	109407	343856	434812	200273
Хабаровск	4606	10912	13882	5897	142772	327368	430334	182812
Кушнаренково	2818	11379	13999	4214	87369	341356	433978	130641
Ноллинск	1758	10688	13998	4692	54513	320626	433949	145437
Нижнедевицк	2800	11278	14090	4773	86793	338328	436801	147965
Павелец	2804	11152	14945	4626	86926	334562	463310	143416
Сытомино	1279	12900	12770	3476	39660	387013	395862	107767
Умба		11904	13937	3071		357121	432043	95204
Ванавара	773	7428	8378	2345	23956	222826	259726	72681
Воейково	963	8738	13282	3189	29854	262128	411729	98859

Таблица 3

**Средние дневные и месячные суммы суммарной освещенности  
при отметке диска Солнца «4» (ясно), клк**

Станции	Средние дневные суммы суммарной освещенности					Месячные суммы суммарной освещенности				
	I	IV	VII	X	XII	I	IV	VII	X	XII
Верхнее Дуброво	4117	34066	46881	14425	127634	1021992	1453317	447189		
Санкт-Петербург		31970	46321	11760		959086	1435946	364560		
Архангельск		25255	36764	6527		757638	1139696	202333		
Чита	8086	40624	49952	17142	250666	1218708	1548501	531391		
Цимлянск	11301	39678	47353	21486	350329	1190344	1467943	666080		
Ершов	8069	40690	47993	20084	250137	1220697	1487768	622601		
Хабаровск	10038	39046	47828	20518	311173	1171380	1482666	674841		
Кушнареново		41566	53006	21826		1246967	1643181	676596		
Ноллинск	4638	35478	46148	13871	143769	1064355	1430586	429995		
Нижнедевицк	8144	35775	46491	17695	252449	1073258	1441218	548548		
Павелец	5617	360050	51534	15346	174122	1081486	1597560	475712		
Сытомино		25035	37826	10521		751040	1172613	326160		
Умба		29692	45548	5841		890759	1411983	181067		
Ванавара	2293	29350	41643	9475	71085	880510	1290918	293641		
Воейково		32933	46697	10069		987983	1447606	312135		



Анализ полученных значений суммарной и рассеянной освещенности показал большую изменчивость освещенности от года к году, на которую кроме естественных погодных факторов (формы и количества облаков) влияет объем выборки (разное количество случаев с тем или иным состоянием солнечного диска). Особенно неравноценные выборки характерны для отметки диска солнца «4» (табл. 2—3).

Расчет по методике МГУ производился по данным 21 станции Европейской территории России за 5 месяцев (январь, апрель, июль, октябрь) за период до 2000 г. Дополнительно рассматривался март месяц, так как на ряде станций в этом месяце подстилающая поверхность может быть покрыта как снегом, так и травой.

Расчеты освещенности по методике МГУ приведены в таблице 4.

На основании данных расчета по методу МГУ исследовалось влияние наличия снежного покрова на освещенность.

На первом этапе работы исходные данные наблюдений за каждый год были разделены по характеру подстилающей поверхности на 2 выборки: «снег» или «трава» (таблица 5). При этом было принято, при  $A \geq 40\%$  данные относились к выборке «снег», при  $A$  меньше  $40\%$  - к выборке «трава».

При расчетах освещенности по данной методике учитывался балл нижней облачности. При облачности менее 8 баллов величина светового эквивалента практически не зависит от облачности (рисунок 1), поэтому рассматривались случаи только для двух условий: для переменной облачности (средний балл дневной облачности не превышает 8,5 баллов) и для пасмурной погоды (средний дневной балл нижней облачности 8,6-10 баллов).

Для анализа зависимости суммарной освещенности от альbedo подстилающей поверхности были рассмотрены корреляционные зависимости между ними (рис. 2—3).

Таблица 4

**Средние суточные суммы суммарной освещенности, рассчитанные  
по методу МГУ, клк/час**

Станции	I	III	IV	VII	X
Бугрино		172		552	50
Умба	4	186	393	580	53
Усть -Вымь	16	217	394	574	74
Воейково	25	228	375	581	92
Санкт-Петербург	19	194	338	558	88
Чермоз	38	275	431	579	78
Валдай	30	238	369	561	108
Нолинск	42	274	429	587	111
Верхнее Дуброво	56	310	455	595	135
Вязовые	52	292	424	590	124
Кушнаренково	64	329	453	608	134
Павелец	66	297	398	590	152
Нижнедевицк.	80	291	398	590	177
Ершов	94	352	483	655	194
Каменная степь	87	310	425	610	186
Ростоши	83	326	441	618	177
Цимлянск	97	320	469	701	246
Волгоград	88	309	468	683	229
Гигант	110	322	474	705	269
Краснодар	110	312	434	655	270
Сочи	124	330	442	691	309

Таблица 5

**Эмпирические зависимости светового эквивалента от высоты солнца  
при различных погодных условиях (Black et al., 1954)**

Количество облаков нижнего яруса в среднем за сутки, балл	Подстилающая поверхность	
	снег	трава
0—8,5	$LE_q = 1,135 \cdot \sinh^{0.0657}$ $R^2 = 0,82$	$LE_q = 1,238 \cdot \sinh^{0.0422}$ $R^2 = 0,61$
8,6—10,0	$LE_q = 1,948 \cdot \sinh^{0.0482}$ $R^2 = 0,81$	$LE_q = 1,629 \cdot \sinh^{0.0533}$ $R^2 = 0,58$

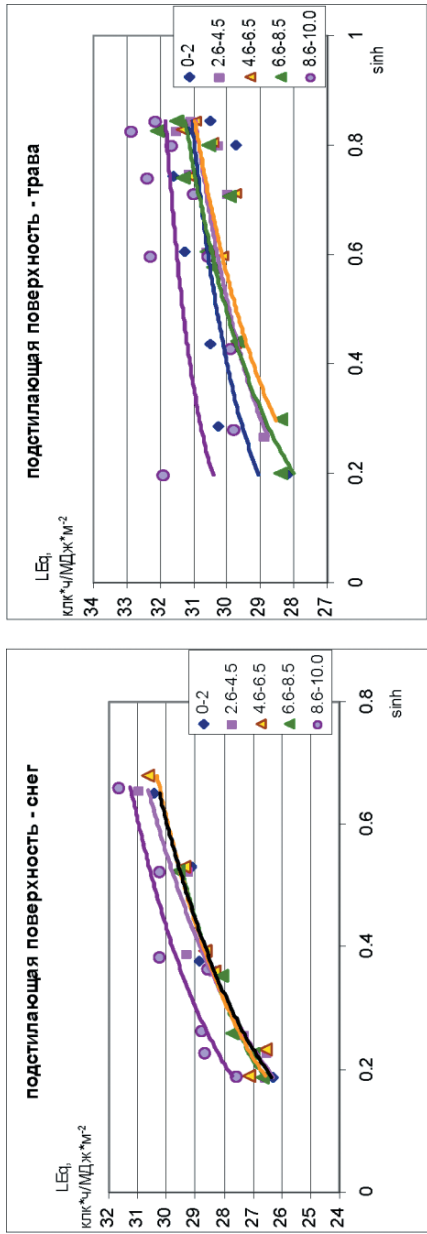


Рис. 1. Зависимость световых эквивалентов суточных сумм от полуденной высоты солнца в холодный (снег) и теплый (трава) периоды года при разном количестве нижней облачности (Black et. al., 1954)

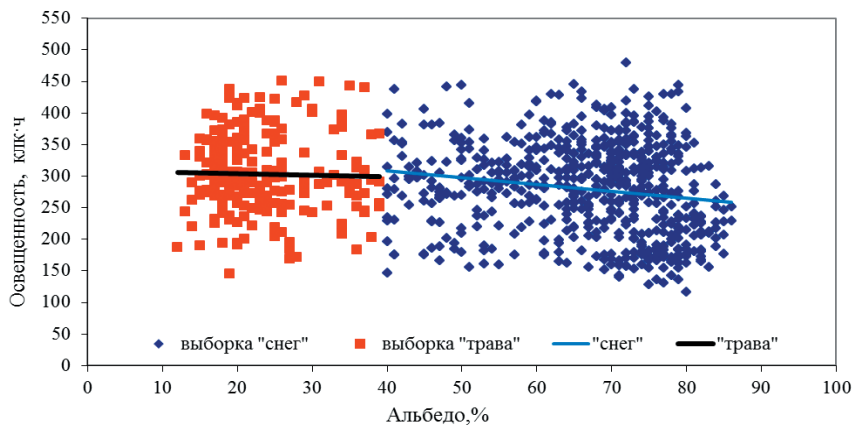


Рис. 2. Зависимость суммарной среднесуточной освещенности от альbedo подстилающей поверхности для выборок «снег» и «трава». Март.

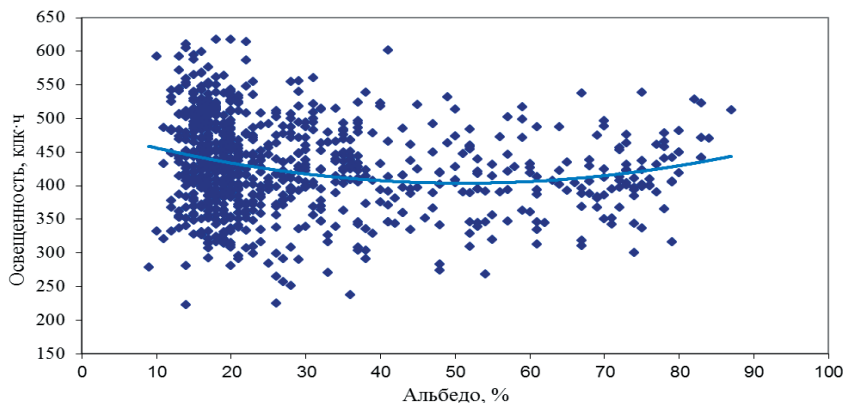


Рис. 3. Зависимость суммарной среднесуточной освещенности от альbedo для выборок «Снег»+ «Трава». Апрель.

На данном этапе работы не удалось выявить четкой зависимости между освещенностью и альbedo подстилающей поверхности.

Исследования подтвердили, что основным фактором, влияющим на суммарную освещенность горизонтальной поверхности, является высота Солнца.

Из рассмотренных 5 месяцев только в марте при разделении наблюдений на две выборки — «снег» и «трава» можно видеть, что естественная суммарная освещенность при наличии снежного покрова несколько выше, чем при растительном покрове (траве). Превышение составляет около 8 % (рис. 4).

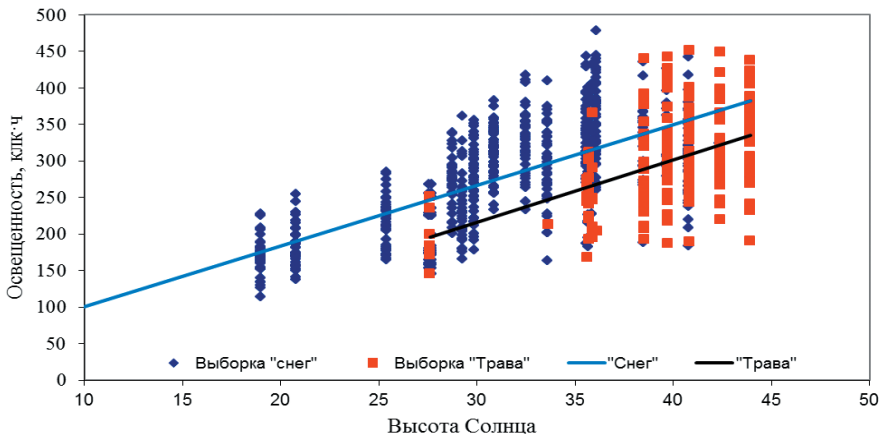


Рис. 4. Зависимость суммарной среднесуточной освещенности от высоты Солнца для выборок «снег» и «трава».

Март.

На рис. 5 приведен аналогичный график для января, на котором также прослеживается увеличение освещенности при одинаковых высотах Солнца.

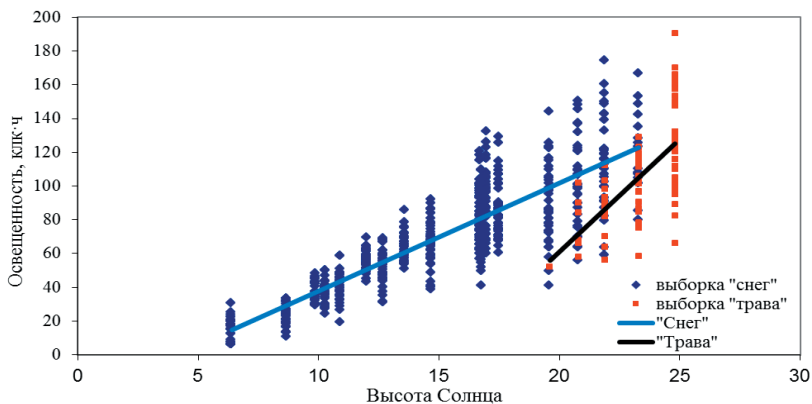


Рис. 5. Зависимость суммарной среднесуточной освещенности от высоты Солнца для выборок «снег» и «трава». Январь.

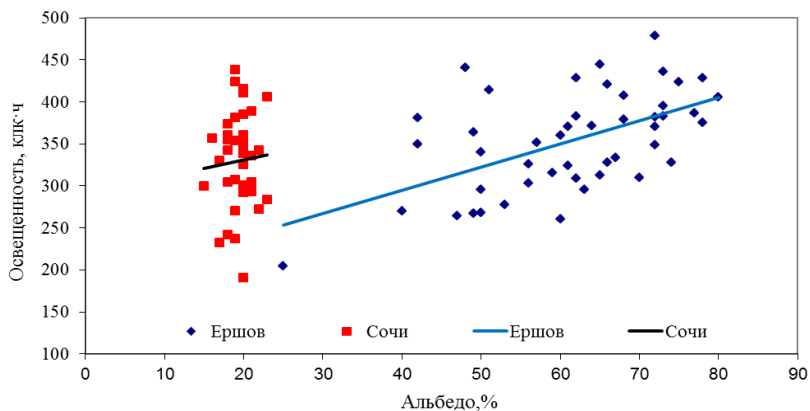


Рис. 6. Зависимость суммарной среднесуточной освещенности от альbedo для станций Ершов и Сочи. Март.

На рис. 6 представлена зависимость освещенности от альbedo земной поверхности для двух станций, расположенных на различных широтах. На одной из них подстилающая поверхность в марте

покрыта травой (Сочи), на другой преимущественно снегом (Ершов). Несмотря на разницу в широте станций, а, следовательно, и в высоте солнца, прослеживается тенденция увеличения освещенности с ростом альбеда подстилающей поверхности.

Анализируя аналогичные зависимости для станций, расположенных в трех широтных поясах 60—68 °, 55—58 °, 51—53 ° с. ш. (рис. 7), был получен следующий вывод. В северных широтах роста освещенности при увеличении альбеда подстилающей поверхности практически не прослеживается, освещенность в этих широтах в рассматриваемом месяце марте очень низкая, в связи с малыми высотами Солнца.

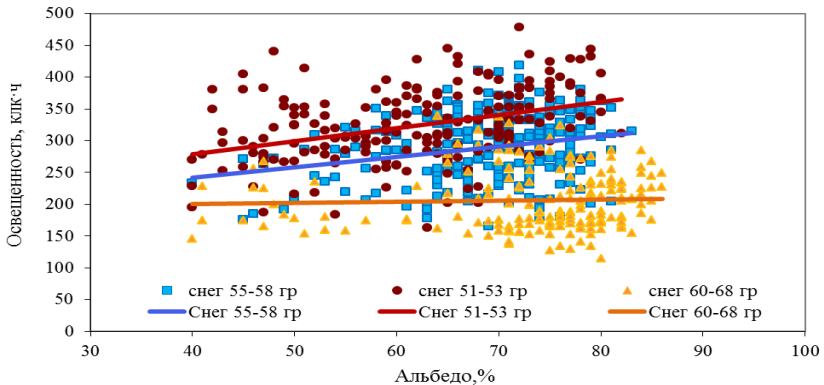


Рис. 7. Зависимость суммарной среднесуточной освещенности от альбеда для разных групп станций, расположенных на широтах: 60—68 °, 55—58 °, 51—53 ° с. ш.

В более южных широтах отмечается рост освещенности с увеличением отражательной способности снега (чем чище снег, тем больше освещенность). Но следует отметить, что увеличение освещенности с ростом высоты солнца (при продвижении с севера на юг) происходит более заметно, чем даже при двукратном росте альбеда снега (от 40 до 80 %). Это еще раз подтверждает вывод о том, что определяющими факторами величины освещенности являются высота солнца, количество и форма облаков.

Для дальнейшего изучения зависимости между альбедо подстилающей поверхности и освещенностью необходимо выборки «снег» и «трава» рассматривать в связке с количеством и формой облаков.

Полученные в работе предварительные результаты будут уточняться на большем объеме материала. Это имеет большое значение для изучения влияния метеорологических факторов на структуру потребления электроэнергии. В совокупность факторов необходимо включать данные основных влияющих факторов — температуры, естественной освещенности, а также дополнительных — влажности и ветра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бартенева О. Д., Довгялло Е. Н., Полякова Е. А.* (1967). Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы // Труды ГГО. Вып. 220. С.

*Бартенева О. Д., Полякова Е. А.* (1966). Световой эквивалент радиации // Метеорология и гидрология. № 2. С.

*Бартенева О. Д., Полякова Е. А., Русин Н. П.* (1971). Режим естественной освещенности на территории СССР. — Л.: Гидрометеиздат. 238 с.

*Шаронов В. В.* (1945). Таблицы для расчета природной освещенности и видимости. — М.: Изд-во АН СССР. 212 с.

Климатические ресурсы солнечной радиации и естественной освещенности и методы их оценки. (2007). / Развернутый научный отчет. Проект РФФИ № 05-0564696. Руководитель проекта — Шиловецова О.А.

Black J. N., Bonithon C. W., Prescott J. A. (1954). Solar radiation and the duration of sunshine // Q.J. Roy. Met. Soc. V. 80. P. 231—235.



УДК 551.509.314: (551.507:629.73)

**О ВЕРИФИКАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ  
КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ  
САМОЛЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ**

*Ю. П. Михайловский*

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

Поступила в редакцию 07.12.2015  
Поступила после доработки 10.12.2015

Верификация численных физико-математических моделей конвективных облаков является важным и необходимым этапом разработки модели, предшествующим ее использованию для решения научно-исследовательских и практических задач. Для успешной адаптации численной модели необходимо обеспечить достаточную полноту, надежность и достоверность экспериментальных данных и схожесть объектов исследований.

Важнейшим свойством конвективных облаков является его пространственно-временная нестационарность. Поэтому экспериментальные значения контролируемых облачных параметров (водности, ледности, размеров частиц, скоростей потоков, зарядов на частицах, электрических полей, отражаемости и др.), используемые для верификации моделей, должны быть «привязаны» к стадии развития облака и относительным координатам измерений в облаке.

В настоящее время наиболее развитые численные модели описывают нестационарное, изолированное, одноячейковое облако со сдвигом ветра. Анализ отечественных и зарубежных работ по

экспериментальным исследованиям конвективных облаков, включая процессы электризации, показал крайнюю немногочисленность таких исследований (Михайловский, 2012; Пономарев и др., 1977; Синькевич, 2001; Сумин и др., 1971; Михайловский и др., 1990; Dye, Jones, 1986). Из зарубежных работ следует упомянуть выполненные группой американских специалистов исследования слоистообразных мезомасштабных конвективных систем в области малоподвижных фронтов (MacGorman et. all, 1999, 2008; Stolzenburg et. all, 1994, 1998). В описанных экспериментах в точках, расположенных на значительных удалениях друг от друга, производились измерения вертикального профиля напряженности электрического поля (E) и радиолокационный контроль. Промежуток времени между измерениями E составлял более часа. При этом предполагалось, что исследуемые процессы электризации этой «мезомасштабной области» стационарны в масштабах нескольких часов и пространственно однородны в масштабах сотен километров. Возможность существования таких процессов вызывает обоснованные сомнения. В любом случае использовать эти данные для верификации численной модели нестационарного, одноячейкового, изолированного конвективного облака весьма затруднительно, т. к. объекты исследований существенно различаются.

Вызывает также сомнения точность внутриоблачных самолетных и баллонных измерений напряженности электрического поля (Имянитов, 1970; Михайловский, 2014; Михайловский и др., 1990; Имянитов и др., 1971; Пономарев и др., 1977; Синькевич, 2001). При таких измерениях особенности заряжения носителей и самих датчиков в условиях контактов с облачной средой могут трактоваться как изменения структуры электрического поля облака (Михайловский, 2014).

Как показано в работе (Михайловский 2014 ), при полетах даже в «теплых» облаках погрешность измерения E увеличивается более чем на порядок. В облаках со смешанной фазой, где могут нарушаться основные допущения этих измерений об однородности электрического поля и эквипотенциальности поверхности самолета, погрешность измерений может увеличиться уже на несколько

порядков, вплоть до неверного определения знака  $E$ . По этой причине даже кратковременные заходы самолета в облако в эксперименте были исключены.

Более предпочтительными представляются эксперименты, представленные в работах (Михайловский и др., 1990, 2012, 2013). Результаты самолетных экспериментов с одноячейковыми, изолированными конвективными облаками обработаны, проанализированы и скомпонованы в виде эмпирической модели электризации в естественном цикле развития и при воздействиях льдообразующим реагентом (Михайловский, Кашлева, 2012; Михайловский, 2015).

Для исследования выбирались изолированные, одноячейковые, долгоживущие облака. Время жизни облака фиксировалось от момента появления его на экране радиолокатора или пересечения вершиной нулевой изотермы.

Параметры облака контролировались при пролетах самолета над облаком прямым и обратным курсом с превышением 100—500 метров над вершиной. При изменении высоты облака соответственно менялась высота полета. В каждом эксперименте стремились исследовать весь цикл жизни облака — от зарождения (превышения вершиной облака нулевой изотермы) до разрушения. Электризация облака контролировалась по напряженности электрического поля над облаком  $E$ , образование и перемещение крупных частиц в облаке и под ним определялось по распределению радиолокационной отражаемости  $Z$  (радиолокационное сечение исследуемого облака по курсу пролета самолета), измеряемой либо самолетным, либо наземным радиолокаторами, либо обоими радиолокаторами, вероятность кристаллизации частиц оценивалась по температуре на высоте верхней границы облака  $H_{vg}$  и визуально по внешнему виду вершины (Михайловский, Кашлева, 2012; Михайловский и др., 1990).

В результате для каждого эксперимента для конкретного облака с дискретностью 4—7 мин была получена серия измерений вышеперечисленных параметров.

Количество пролетов для каждого облака составляло от 1 до 20. Всего было исследовано свыше 100, из которых около 60 облаков

участвовали в рандомизированном эксперименте по воздействию на их электрическое состояние с 3-мя целями:

- усиление электризации;
- ослабление электризации;
- естественный цикл развития облака.

Воздействия проводились пиропатронами ПВ-50 с AgI при превышении верхней границей облака изотермы  $-10^{\circ}\text{C}$ . В зависимости от случайно выбираемой цели рассчитывалось необходимое количество реагента, вводимого в переохлажденную часть облака, обеспечивающее либо усиление, либо ослабление процессов электризации (Михайловский и др., 1990, Михайловский, Кашлева, 2012, Михайловский, 2015). Контроль облака после воздействий после воздействий осуществлялся по методике, представленной выше.

При анализе результатов экспериментальных данных удалось выделить общие закономерности развития электризации конвективных облаков. Они оказались достаточно универсальными, характерными при развитии:

- летних континентальных облаков средней полосы России, высота верхней границы которых за время эксперимента изменялась с 4-х до 8-и км,
- осеннее-зимних (18 ноября) облаков над морем в районе Сухуми, где высота верхней границы облака в эксперименте изменилась незначительно,
- тропических облаков над островом Куба и окружающими морями.

### **Результаты анализа экспериментов**

При анализе результатов удалось выделить неизвестные ранее общие закономерности развития электризации конвективных облаков, которые могут быть использованы для настройки параметров и верификации численных моделей:

- Процесс электризации облака отсутствует (не может быть обнаружен используемыми методами и средствами), т. е. E над

облаком равно фоновым значениям на высоте полета, если в облаке нет условий для роста крупных ледяных частиц: верхняя граница конвективного облака ( $H$ ) находится ниже изотермы  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1а, табл. 1), максимальная величина отражаемости под облаком (ниже уровня конденсации) ( $Z_{oc}$ ) по самолетному радиолокатору не превышает  $0\text{ дВЗ}$  (рис. 1б, табл. 1), толщина переохлажденной части облака ( $dH$ ) не превышает  $1,6\text{ км}$  (табл. 1). Характеризуем это состояние облаков «индексом электризации»  $I_E=0$ .

– Процесс электризации облака начинается и может либо наблюдаться, либо отсутствовать, т. е.  $E$  над облаком может увеличиваться до  $50\text{—}100\text{ В/м}$  и более, только тогда, когда в облаке появляются условия для роста крупных ледяных частиц: верхняя граница конвективного облака ( $H$ ) находится выше изотермы  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1а, табл. 1), максимальная величина отражаемости под облаком (ниже уровня конденсации) ( $Z_{oc}$ ) по самолетному радиолокатору превышает  $0\text{ дВЗ}$  (рис. 1б, табл. 1), толщина переохлажденной части облака ( $dH$ ) превышает  $1,6\text{ км}$  (табл. 1).  $I_E$  этом может быть равно либо  $0$ , либо  $1$  ( $I_E=0/1$ ).

– Электризация облака наблюдается обязательно, если в вершине облака идет интенсивный процесс кристаллизации (образования крупных ледяных частиц), верхняя граница облака превышает изотерму  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1а, табл. 1), отражаемость осадков превышает  $40\text{ дВЗ}$  (рис.1б, табл. 1), толщина переохлажденной части более  $2,6\text{ км}$ , (табл. 1), визуальное состояние вершины свидетельствует об интенсивной кристаллизации вершины (Михайловский, Кашлева, 2012). Для этого состояния облаков  $I_E=1$ .

Для каждого из контролируемых параметров можно определить 3 интервала  $I_E$ , в которых электризация в облаке при данном значении параметра  $I_E$ :

– всегда отсутствовала ( $I_E = 0$ ), т. е. изменения  $E$  над облаком относительно фоновых значений электрического поля не могли быть зафиксированы используемой системой датчиков;

– наблюдалась только в части экспериментов (пролетов) ( $I_E=0/1$ );

– наблюдалась всегда, при всех пролетах ( $I_E = 1$ ).

Таблица 1

## Граничные значения интервалов контролируемых параметров

Параметры облака	$I_E = 0$	$I_E=0/1$	$I_E = 1$
dH км	<1,6	1,6. < dH < 2,6	> 2,6
Zоб дВЗ	< 10	10 < Zоб < 40	> 40
Zос дВЗ	< 0	0 < Zос < 40	> 40
D км	< 3	3 < D < 6	> 6
dH км	< 2,0	2,0 < dH < 3,2	> 3,2
H км	< 3,2	3,2 < H < 4,6	> 4,6
Tвг °С	> -8	-8 < Tвг < -22	< -22

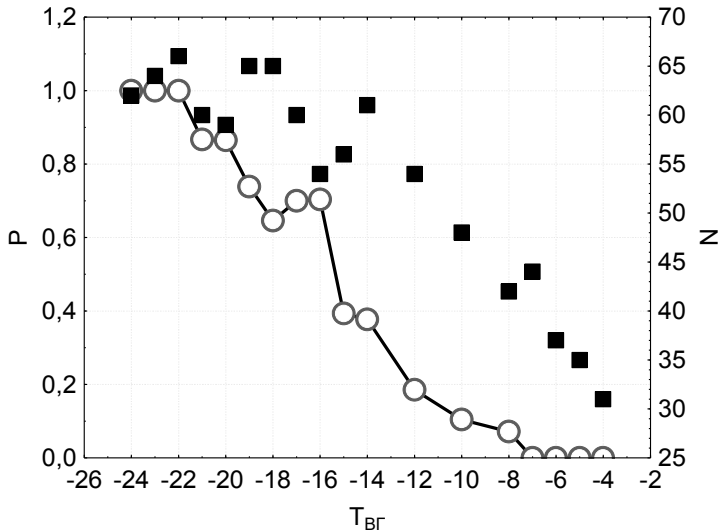


Рис. 1. Вероятность начала организованной электризации (P) от температуры на уровне верхней границы облака (Tвг),  
N — количество рассмотренных случаев.

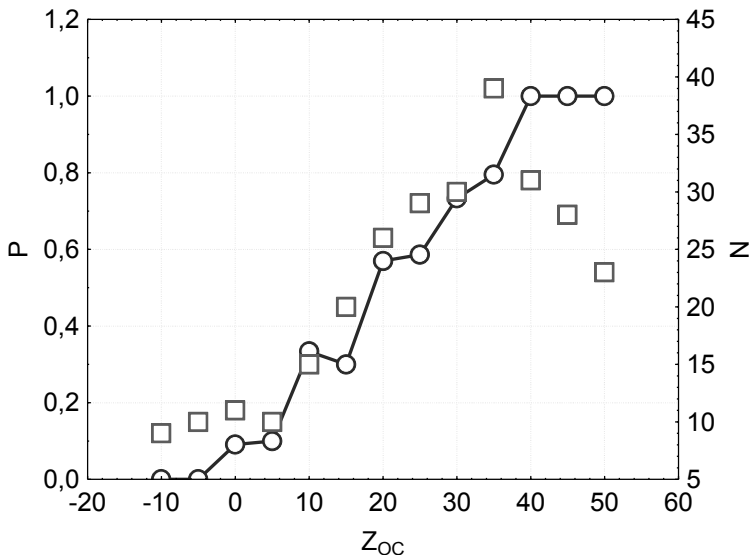


Рис. 2. Вероятность начала организованной электризации (P) от отражаемости ниже уровня конденсации ( $Z_{oc}$ ),  
N — количество рассмотренных случаев.

В таблице 1 приведены границы этих интервалов для «толщины» переохлажденной части  $dH$  км, максимальной отражаемости во всем облаке  $Z_{об}$  дВЗ, максимальной отражаемости ниже нижней границы облака (осадки)  $Z_{ос}$  дВЗ, диаметра облака  $D$  км, разницы между верхней и нижней границами облака  $dH$  км, высоты верхней границы  $H$  км, температуры на уровне верхней границы  $T_{вг}$  °С.

Уравнение множественной шаговой регрессии с выбором существенных факторов для зависимой переменной  $I_E=0/1$  и 7 независимых (см. табл. 1) имеет вид:

$$E = 0.17\Delta H_{T \leq 0} + 0.004Z_{обл} + 0.004Z_{ос} + 0.02D + 0.08\Delta H + 0.08H_{вг} + 0.001T_{вг} - 0.32 \quad (1)$$

Для облаков, развивающихся в районе о. Куба, (тропические облака, в том числе и над морем) рассмотренные выше закономерности меняются несущественно. Процесс электризации этих облаков начинается, т. е.  $E$  над облаком увеличивается до сотен и более В/м, также только тогда, когда в облаке появляются условия для роста крупных ледяных частиц (верхняя граница конвективного облака превышает изотерму  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и электризация облака наблюдается обязательно, если в вершине облака идет интенсивный процесс кристаллизации (образования крупных ледяных частиц) (облако выше изотермы  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (Михайловский, Кашлева, 2012));

Важной закономерностью развития процесса электризации, установленной при анализе результатов самолетных экспериментов, является смена знака напряженности электрического поля над облаком. На начальной стадии развития вертикальная составляющая  $E$  над облаком положительна, т. е. имеет то же направление, что и поле «хорошей погоды» (характерно для облачного диполя с верхним отрицательным зарядом). На стадии зрелости и разрушения  $E$  обычно меняет знак на обратный, т. е. эквивалентный облачный диполь как бы переворачивается (рис. 2, (Михайловский, Кашлева, 2012));

При анализе большого количества экспериментальных данных были рассчитаны регрессионные связи максимальных значений  $E$  при пролете над облаком ( $E_m$ ) с некоторыми контролируемыми параметрами (формулы 2—5)

$$E_m = 0,12H - 3600 \quad (2)$$

$$E_m = 0,12dH - 2600 \quad (3)$$

$$E_m = 446T_{BG} - 430 \quad (4)$$

$$E_m = 0,11D (м) - 3200 \quad (5)$$

На стадии развития наиболее тесная, близкая к линейной, статистическая связь наблюдается между  $E_{max}$  и площадью сечения облака  $S_{35}$ , которая расположена выше нулевой изотермы и отражаемость в которой выше  $35\text{ dBZ}$  (см. ф-лы (6), (7), (Михайловский, Кашлева, 2012))



$$E_{max} = 0.00072 S_{Z35}^-(кВ.м) - 500 \quad (6)$$

$$E_{max} = 0.0005 S_{Z35}^-(кВ.м) + 0.1 \Delta H_{T \leq 0}(м) - 150 \quad (7)$$

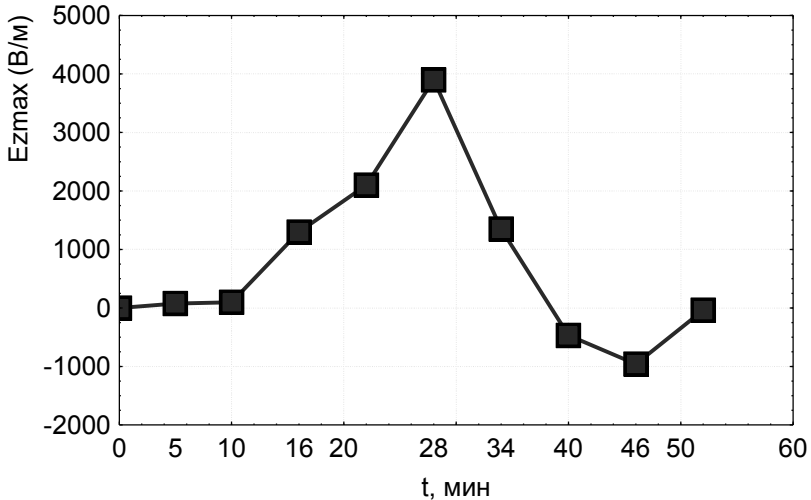


Рис. 3. Типичные изменения максимальных значений вертикальной составляющей напряженности электрического поля при пролете над облаком ( $E_{zmax}$ ) в процессе развития облака.

Эта универсальность законов развития обусловлена выбором контролируемых параметров. Еще И. М. Имянитов отмечал, что электрическое поле, генерируемое облаком, является общей интегральной характеристикой его состояния (стадии развития) и в этом смысле эта характеристика ( $E$ ) оптимальна. Электризация облака тесно взаимосвязана со всеми процессами в облаке (Имянитов и др., 1971, Ruppache, Klett, 1997). Согласно принятой нами базовой гипотезе для электризации конвективного облака необходимы достаточно крупные ледяные частицы, с появлением которых

начинается организованная электризация (микро и макроэлектризация) доступная для обнаружения вне облака существующими методами и средствами. Определение состояния облака в момент начала организованной электризации является очень важным критерием сбалансированности моделируемых процессов в численной модели и возможности адаптации модели в целом к представленным результатам экспериментов. Можно вспомнить, что совсем недавно существовали численные модели без ледяной фазы, которые успешно проходили верификацию и давали грозу за реальное время около 30 минут.

Е над облаком является прямой, функциональной и интегральной характеристикой всей совокупности заряженных частиц облака, характеризует результат микроэлектризации и макроразделения зарядов и в этом смысле оптимальна.

Важной характеристикой являются также радиолокационные разрезы облака. Они позволяют судить когда, где и в каких количествах появляются в облаке крупные частицы. Расчет  $Z$  в ЧМ также не должен вызвать особых затруднений. Также как и сравнение параметров, характеризующих процессы кристаллизации. Таким образом, на первом этапе верификации ЧМ предлагается проверять, выполняются ли основные закономерности, сформулированные выше. В дальнейшем возможна проверка ЧМ на результатах экспериментов с конкретным облаком и конкретной аэрологической диаграммой.

По аналогичной методике и с использованием того же набора измерительных средств проводились рандомизированные самолетные эксперименты по воздействиям на электрическое состояние конвективных облаков с альтернативными целями (усиление или ослабление электризации), результаты которых также могут использоваться для верификации чувствительности модели к воздействиям льдообразующим реагентом (Михайловский, Кашлева, 2012; Михайловский, 2015; Михайловский и др, 1990). Было установлено, что при воздействиях «малыми» количествами льдообразующего реагента наблюдается усиление (ускорение) процессов электризации, контролируемых по  $E_m$ . При больших концентрациях льдообразующих ядер, концепция «перезасева»,

наблюдалась быстрая кристаллизация вершины и ослабление (замедление) процессов электризации (Михайловский, 2015).

## **Выводы**

В результате экспериментальных самолетных исследований начальной (догрозовой) стадии развития процессов электризации были установлены следующие эмпирические закономерности, которые могут быть использованы для верификации численных физико-математических моделей изолированных конвективных облаков.

1.1. Расчетное значение напряженности электрического поля на уровне 50—100 м над верхней границей облака не должно превышать 10 В/м, если для рассчитанных в модели параметров облака выполняется хотя бы одно из условий первого столбца Таблицы 1.

1.2. Величина напряженности электрического поля, рассчитанная моделью на уровне 50—100 м. над верхней границей облака, должна превышать 50 В/м. если для рассчитанных в модели параметров облака выполняется хотя бы одно из условий третьего столбца Таблицы 1.

1.3. Величина напряженности электрического поля, рассчитанная моделью на уровне 50—100 м. над верхней границей облака, может принимать значения от 0 до до 100 В/м. и более если для всех рассчитанных в модели параметров облака выполняются условия второго столбца Таблицы 1. Вероятность отличия рассчитываемого электрического поля от 0 может быть оценена с помощью уравнения (1) множественной шаговой регрессии с выбором существенных факторов для зависимой переменной  $E$  и 7 независимых.

2.1. Напряженность электрического поля, рассчитанная моделью на уровне 50—100 м. над верхней границей облака, на начальной стадии развития процесса электризации имеет положительный знак, совпадающий с полем «хорошей погоды». На стадии зрелости и разрушения облака знак напряженности поля может поменяться на отрицательный, наблюдаемый обычно над грозовыми облаками.

3.1. Изменения величины напряженности электрического поля,

рассчитанной моделью на уровне 50—100 м. над верхней границей облака, должны соответствовать рассчитанным в модели параметрам облака в соответствии с регрессионными уравнениями 2—7.

4.1. При моделировании воздействия льдообразующими реагентами для усиления электризации и создании в области восходящих потоков в зоне между изотермами  $-5 \div -15$  °С концентрации ядер кристаллизации порядка  $10 \sim 1000$  в кубическом метре примерно через 10 минут «облачного» времени должно наблюдаться увеличение максимальных рассчитанных значений  $E$  над облаком по сравнению с «естественным циклом» и альтернативными воздействиями на ослабление электризации.

4.2. При моделировании альтернативных воздействий льдообразующими реагентами и создании в области восходящих потоков в зоне между изотермами  $-5 \div -15$  °С концентрации ядер кристаллизации порядка  $10^5$  и более в кубическом метре примерно через 10 минут «облачного» времени должно наблюдаться уменьшение максимальных рассчитанных значений  $E$  над облаком по сравнению с «естественным циклом» и воздействиями на усиление электризации.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 16-05-00197А и 15-55-45026 ИНД\_а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

*Михайловский Ю. П.* (2014). О технологии контроля напряженности электрического поля атмосферы и облаков с помощью самолетов-лабораторий. // Методы и устройства передачи и обработки информации. ISSN 2220-2609, № 16. С. 41—45.

*Михайловский Ю. П., Ефременко А. Н., Жуков В. Ю., Караваев Д. М., Лобанов К. А., Щукин Г. Г.* (2013). Параметризация электрического состояния конвективных облаков на основе данных пассивно-активной радиолокации. / В сб.

Труды 28 Всероссийского симпозиума “Радиолокационное исследование природных сред”. Т. 2. — СПб. С. 359—366.

*Михайловский Ю. П., Кашлева Л. В.* (2012). Методика и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью самолетов. /В сб. Радиолокационная метеорология и активные воздействия. — СПб: Д<sup>т</sup> АРТ. С. 98—114.

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

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

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

*Сумин Ю. П., Шварц Я. М.* (1971). Электрическое поле в окрестности кучевых облаков, подвергнутых воздействию // Труды ГГО. Вып. 262. С. 157—162.

*Михайловский Ю. П., Гальперин С. М., Кашлева Л. В., Степаненко В. Д.* (1990). Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при активных воздействиях. Самолетные исследования. / В сб. Проблемы атмосферного электричества. — Л.: Гидрометеиздат. С. 89—112.

*Dye I. E., Winn W. P., Jones I. I., Breed D. W.* (1988). Observations of the initial electrification of thunderstorms. — Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference Atmospheric Electricity. Upsala. P. 410—415.

*Dye I. E., Jones I. I.* (1986). Early electrification and precipitation development in a small isolated Montana Cumulonimbus. // J. of Geoph. Res. V. 91. № 1. 3 P. 1231—1247.

*MacGorman, D. R., Rust D., Schuur T., Biggerstaff M., Straka J., Ziegler C., Mansell E, Bruning E., Kuhlman K., Lund N., Biermann N., Payne C , Carey L., Krehbiel P., Rison W., Eack K., Beasley W.* (2008). TELEX: The Thunderstorm Electrification and Lightning Experiment // Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 89. P. 997—1013. doi: 10.1175/2007BAMS2352.1, 2008.

*MacGorman D. R., Rust W. D.* (1999). The electrical nature of storms — NewYork: Oxford Univ. Press. 422 p.

*Stolzenburg, M., Rust W. D., Marshall T. C., Smull, B. F.* (1994). Horizontal distribution of electrical and meteorological conditions across the stratiform region of a mesoscale convective system // Mon. Wea. Rev. V. 122. P. 1777—1797.

*Stolzenburg M., Rust W. D., Marshall T. C.* (1998), Electrical Structure in Thunderstorm Convective Regions // J. Geoph. Res. V. 103, 14, 097, doi:10.1029/97JD03545.

*Pruppache, H. R., Klett J. D.* (1997): Microphysics of Clouds and Precipitation. — Kluwer Academic Publishers. 954 p.

**СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАГОЗАПАСА АТМОСФЕРЫ  
И ВОДОЗАПАСА ОБЛАКОВ**

*Д. В. Дроздов, Ю. В. Рыбаков, О. А. Герасимов*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: drozdov@solarixx.com,  
y.rybakov@mail.ru

Поступила в редакцию 5.11.2015

Поступила после доработки 20.03.2016

**Введение**

Научные исследования, связанные с возможностью дистанционного мониторинга параметров атмосферы с помощью СВЧ радиометрии проводятся в ГГО на протяжении почти 50 лет. За этот период были выполнены многочисленные исследования, связанные как с разработкой теоретических основ дистанционного СВЧ мониторинга (Рабинович, Щукин, 1968) так и с решением различных методических и технических вопросов определения влажностных характеристик атмосферы и облаков с помощью наземных и бортовых систем.

Аналогичные работы проводились в ЦАО, ИРЭ АН СССР и ряде других организаций (Степаненко и др, 1987). Все выполненные работы заканчивались, как правило, изготовлением отдельных экземпляров аппаратуры и проведением ограниченных по времени экспериментальных работ с наземных пунктов или с борта самолётов-лабораторий. Лишь в последнее время появилась возможность создания ограниченной сети наземного влажностного зондирования, которая позволяет проверить возможности метода при внедрении в

оперативную практику работы гидрометслужбы.

В качестве основного технического средства, начиная с 2008 г, в ГГО совместно с ЭПМГГО и СПбГПУ был разработан бюджетный образец СВЧ радиометрического комплекса, который с различными модификациями использовался как для оснащения самолёта-лаборатории ЯК-42Д «Атмосфера» (Рыбаков, 2014), так и для наземных пунктов.

В России для работы используются частоты 37 ГГц и 22,2 ГГц (Щукин, 1985), окно прозрачности атмосферы и линия поглощения водяного пара. Основные принципы построения радиометрических приёмников подробно рассмотрены в литературе (Есепкина, Корольков, Парийский, 1973).

На Западе использовались центральные частоты диапазонов 20.6 ГГц и 31.65 ГГц (Westwater, Suider, Falls, 1990). Наиболее полный и последовательный обзор методов и средств дистанционного пассивного зондирования параметров атмосферы содержится в трёхтомнике (Ulaby, Moore, Fung, 1986).

В данной статье приводится описание разработки серийных радиометрических комплексов влажностного зондирования атмосферы (РК ВЗА). Первые образцы комплексов были установлены в п. Восейково и п. Тикси в 2013 году. Последние РК ВЗА были введены в эксплуатацию в 2015 году. Таким образом была организована региональная сеть ВХА на территории Ленинградской области и завершилось построение наблюдательной сети дистанционного зондирования атмосферы и облаков.

### **Структурная схема комплекса. Особенности конструкции**

В качестве основы наблюдательного комплекса была выбрана одна из наиболее распространённых, в силу своей простоты в реализации, схема компенсационного радиометрического приёмника. Для снижения влияния собственных шумов приёмника реализован модуляционный режим работы. Упрощённая структурная схема РК ВЗА приводится на рис. 1.

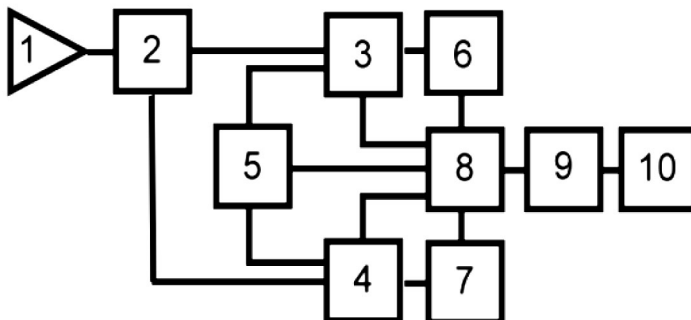


Рис. 1. Структурная схема радиометрического комплекса  
 1) антенна, 2) делитель поляризаций, 3,4) модулятор,  
 5) контрольный сигнал, 6,7) радиометрические приёмники, 8)  
 низкочастотная часть, 9) АЦП, 10) компьютер

Основные технические характеристики радиометрического комплекса:

- пирамидальный гофрированный рупор с линзой из фторопласта;
- диаграмма направленности 9 градусов по главному лучу;
- центральные частоты каналов 37 ГГц 22,2 ГГц 19 ГГц;
- рабочая полоса 1000 МГц для 1-го канала, 500 МГц для других;
- неравномерность в полосе усиления не более 1 дБ;
- прямые потери в полосе 2 ГГц, не более 1 дБ;
- затухание в рабочей полосе РМУ, не менее 20 дБ;
- коэффициент шума входных усилителей не более 3 дБ.

Первоначальная конструкция антенного блока предусматривала отдельные измерительные каналы. Каждый радиометр использует собственную антенну, приёмник, устройство контроля работоспособности (рис. 2). Антенный датчик каждого РМУ выполнен в виде гофрированной рупорно-линзовой антенны с расчётной шириной диаграммы направленности 5—7° на центральной частоте и коэффициентом рассеяния вне главного лепестка порядка 1 %.



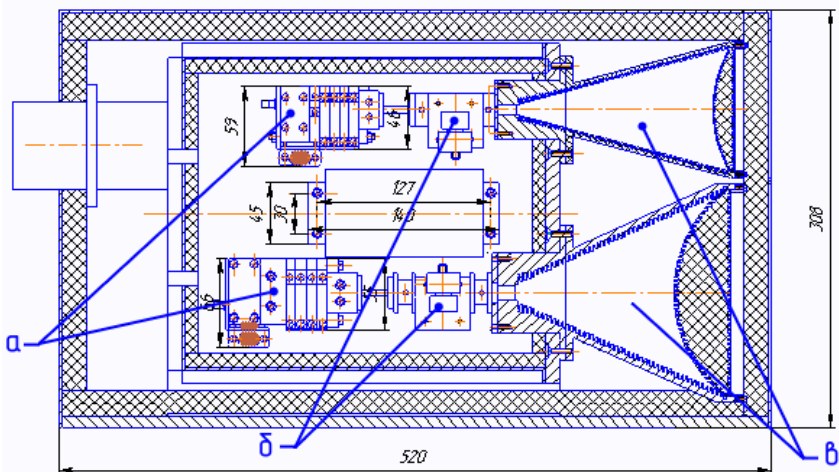


Рис. 2. Конструкция антенного блока радиометрического комплекса  
 а) приёмники, б) система контроля, в) антенны

СВЧ-радиометры собраны в виде модульной конструкции по схеме модуляционного приемника прямого усиления на базе широкополосных усилительных микрочипов диапазона  $f = 20\text{—}40$  ГГц (рис. 3). Все электронные элементы — поверхностного монтажа. Ширина полосы пропускания на входе приёмника определяется полосковыми фильтрами. Минимальная ширина проводника такого фильтра — 200 мкм.

Модуляционный режим реализован применением волноводных рин-аттенуаторов. Демодуляция осуществляется синхронным детектором на полупроводниковой логике. Для дальнейшего усиления применяются высокостабильные (т. н. «нулевого дрейфа») усилительные микросхемы.

Оцифровка выходных сигналов радиометров производится многоканальным промышленным АЦП с достаточно высоким быстродействием, способное обеспечить ежесекундные измерения. Для сбора данных и управления прибором используются портативные компьютеры.

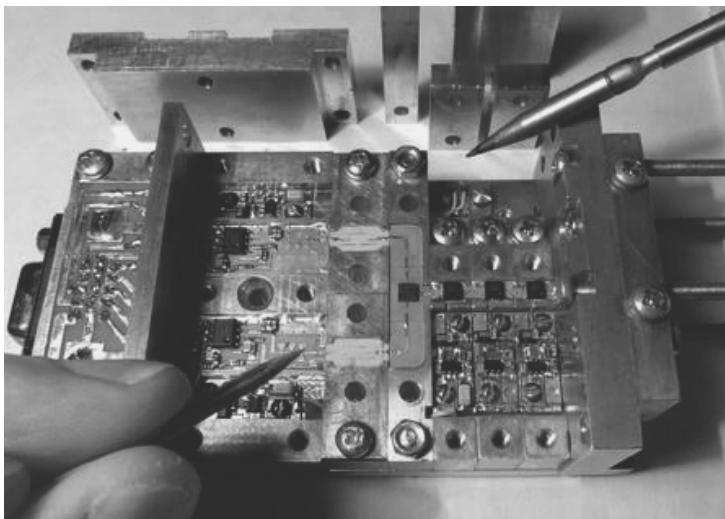


Рис. 3. Внутреннее устройство радиометров на примере двухканального приёмника 19—22 ГГц.

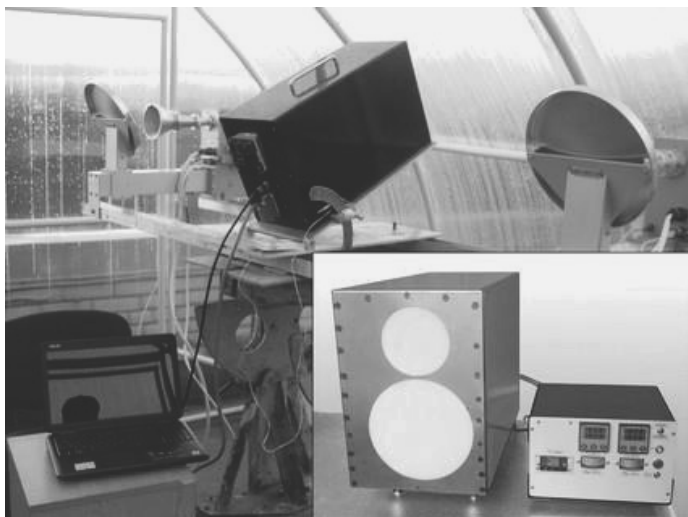


Рис. 4. Общий вид РК ВЗА и его установка в Воейково

Общая компоновка прибора двухблочная (рис. 4). СВЧ элементы и волноводные тракты располагались в отдельном блоке, для которого была применена двухконтурная система термостатирования. Первый контур работал непосредственно на приёмной высокочастотной части, обеспечивая ей постоянный температурный режим с точностью  $\pm 0,1$  °С. Это необходимо для снижения искажений, возникающих от изменения собственного шумового излучения приёмных элементов при нагреве или охлаждении, и обеспечения долговременной стабильности измерений.

Низкочастотная элементная часть, включая импульсные преобразователи питания, была вынесена в отдельный блок. Таким образом минимизировалось электромагнитное воздействие, неизбежно возникающее в подобных элементах, на высокочастотные тракты.

Для контроля работоспособности, необходимого при автономной работе прибора, применялись твердотельные источники «тёплого» шумового сигнала, превышающего по уровню принимаемые сигналы. Система способна работать как в ручном режиме, по команде оператора, так и в автоматическом, срабатывая регулярно в заданном промежутке времени.

### **Улучшенная антенная система и глубокая модернизация РК ВЗА**

С целью удешевления конечной стоимости прибора путём сокращения некоторых особо дорогостоящих узлов для комплекса была произведена разработка нового антенного датчика. Поскольку принимаемое собственное шумовое излучение атмосферы не обладает явно выраженной поляризацией, возможен приём этого излучения пирамидальной антенной, с делением диапазонов по поляризациям. Радиометрические устройства используют общую антенну — пирамидальный гофрированный рупор с линзой из фторопласта. Канал 37 ГГц работает на вертикальной поляризации, каналы 19—22 ГГц — на горизонтальной через делитель поляризаций (рис. 5).

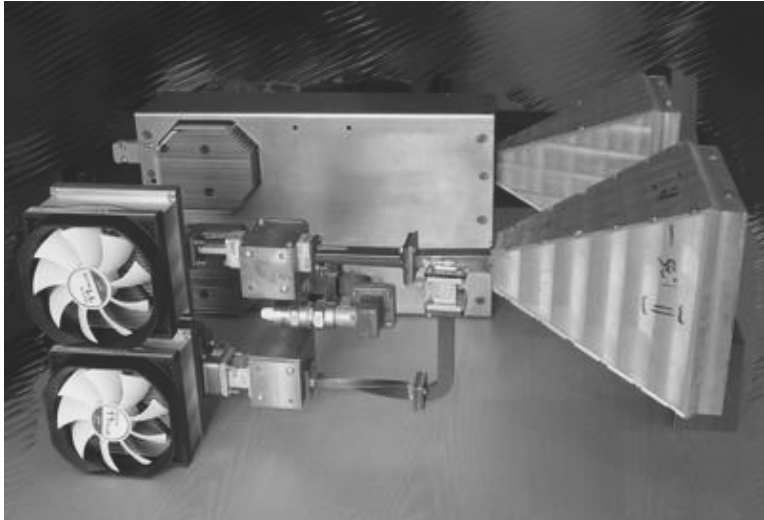


Рис. 5. Улучшенная антенная система радиометров.

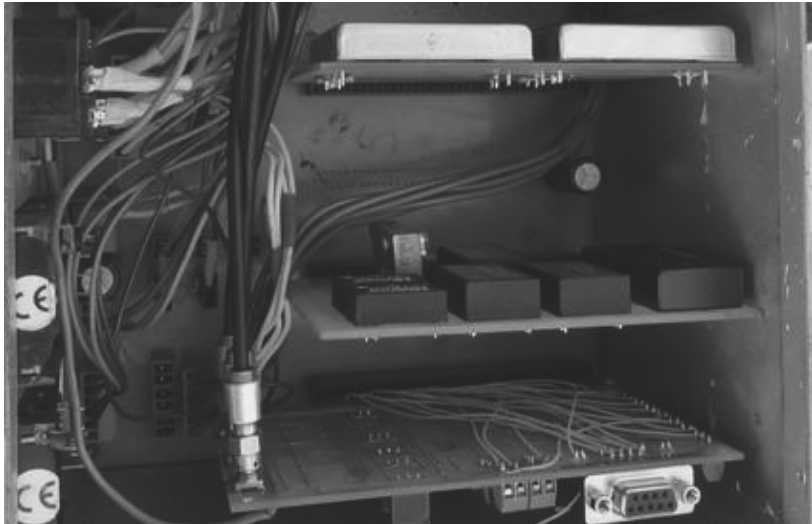


Рис. 6. Модульная печатная архитектура электроники РК ВЗА.

Далее было принято решение объединить электронный и антенный блоки в одном корпусе с минимизацией разъёмных соединений. Для этого взамен навесного монтажа элементов была разработана модульная печатная структура (рис. 6). Такой способ разделения узлов по функциональному назначению позволил улучшить ремонтпригодность всего комплекса. При выходе из строя какого-то преобразователя или узла, достаточно заменить соответствующую плату, что может сделать персонал с минимальной технической квалификацией.

Управление системой контроля работоспособности доработано для включения по сигналу компьютера, с возможностью автоматического запуска как внутри программы, так и по команде из центра сети.

Отдельным этапом модернизации стало улучшение системы термостатирования. Внутри одного объёма мы стараемся стабилизировать температуру приёмников, и тут же имеем множество других элементов, которые постоянно дают положительный прирост тепла. В том числе тепло, которое тратится на охлаждение приёмников. Поэтому нужно было не только разделить эти объёмы, но и обеспечить в каждом приемлемые температурные режимы.

Для этого область СВЧ и волноводные тракты помещаются в отдельный изолированный объём, на который работают системы термостатирования. Металлический корпус экранирует волноводную структуру и СВЧ приёмники от внешних электромагнитных воздействий. Прочая низкочастотная электроника функционирует в отдельном объёме, обеспеченном вытяжной вентиляцией. Это позволяет даже при высоких температурах окружающей среды избегать перегрева преобразователей.

Проведение климатических испытаний модернизированного РК ВЗА должно было установить температурный диапазон работы прибора.. Для проверки на максимально возможный нагрев прибор остужался до уличной температуры. Для проверки охлаждения прибора помещение нагревалось. Также имитировался нагрев солнечным излучением. Испытания дали оценочный результат рабочего диапазона  $-10^{\circ}..+40^{\circ}$  температуры окружающей среды.

## Пакет компьютерных программ

.Для того, чтобы обеспечить непрерывную работу приборов на сети, передачу больших массивов данных, централизованное их хранение и потоковую обработку, потребовалось разработать пакет компьютерных программ (Дроздов, Семёнов, 2013). Изначально предполагалась работа приборов по сети Интернет и предоставление доступа потребителям к серверу для получения данных.

В первую очередь был разработан опытный пакет программ, на котором проводилась отработка базовых возможностей сбора, передачи, хранения и визуализации наблюдений ВХА. Пакет можно разделить на две основные части: серверную и клиентскую. Серверная часть работает с данными по всей сети на сервере и в центре сбора данных и рассматривается в другой статье (Дроздов, Рыбаков, 2016).

Клиентская часть программного обеспечения управления и регистрации результатов измерений СВЧ радиометрического комплекса влажностного зондирования атмосферы (Свидетельство № 2014612596 от 03.03.2014) работает на компьютере ПК ВЗА, осуществляет сбор данных, первичную обработку и передачу на сервер. Первичная обработка заключается в преобразовании выходных сигналов радиометров в единицы яркостной температуры. Преобразование линейное, производится по введённым в конфигурационный файл программы масштабным коэффициентам, определяемым при калибровке ПК ВЗА.

Опытная эксплуатация пакета позволила сформулировать улучшенные технические требования к программному комплексу сети ВХА. Компьютер ПК ВЗА был переведён на платформу Linux, как более надёжную и стабильную, обладающую большими возможностями дистанционного управления и автоматизации работы. Соответственно было разработано новое программное обеспечение обработки данных наблюдений ВХА и управления прибором ПК ВЗА (Свидетельство № 2014611207 от 28.01.14).

В результате последней модернизации ПК ВЗА в программу «Обработка данных ВХА и управление прибором ПК ВЗА 1.0» была добавлена возможность опроса состояния термостатов и коррекции показаний приёмников по их температуре, а также механизм

управления системой контроля. В последней версии введены и менее значительные улучшения. Например, для наблюдателя на экране компьютера отображается график (рис. 10) в виде временного хода яркостных температур для трёх частотных каналов за последний час. График обновляется ежеминутно. Дополнительно, можно вызвать ежесекундные графики в первичных единицах (Вольтах) и преобразованных (Кельвинах).

### **Сравнительные измерения серийных РК ВЗА**

Основным показательным экспериментом является одновременная работа нескольких серийных экземпляров сетевых измерительных приборов в одном месте. Такой эксперимент проводился для четырёх экземпляров РК ВЗА в п. Воейково в течение нескольких дней (рис. 7) и для двух экземпляров РК ВЗА в течение нескольких месяцев 2015 года. Как и следовало ожидать, изменения показаний приборов в зависимости от изменения параметров влагосодержания атмосферы и облаков носили одинаковый характер. Четыре РК ВЗА зав. № 3 (271), 6 (466), 7 (231) и 8 (818) были выставлены на крыше в защитных метеобоксах для проведения измерений в направлении зенита. Как и следовало ожидать, изменения показаний приборов (рис. 8) в зависимости от изменения параметров влагосодержания атмосферы и облаков носили одинаковый характер.

Совместив пересчитанные в единицы влагосодержания показания четырёх приборов на одном графике (рис. 9) со значениями рассчитанными по данным аэрологических наблюдений мы можем наблюдать одинаковый характер изменения показаний.

В момент времени 16:00 ВСВ фиксируется мощное повышение уровня сигнала по всем комплексам, что соответствует прохождению облака с большим содержанием жидкокапельной влаги и выпадению ливневых осадков. Незначительное расхождение в показаниях комплексов не вносит существенных искажений в общую картину. Эти отклонения могут быть связаны с погрешностью при калибровке приборов, не учитываемой при вводе калибровочных коэффициентов.



Рис. 7. Контрольные испытания четырёх РК ВЗА.



Рис. 8. Показания нескольких РК ВЗА при прохождении облаков с осадками.



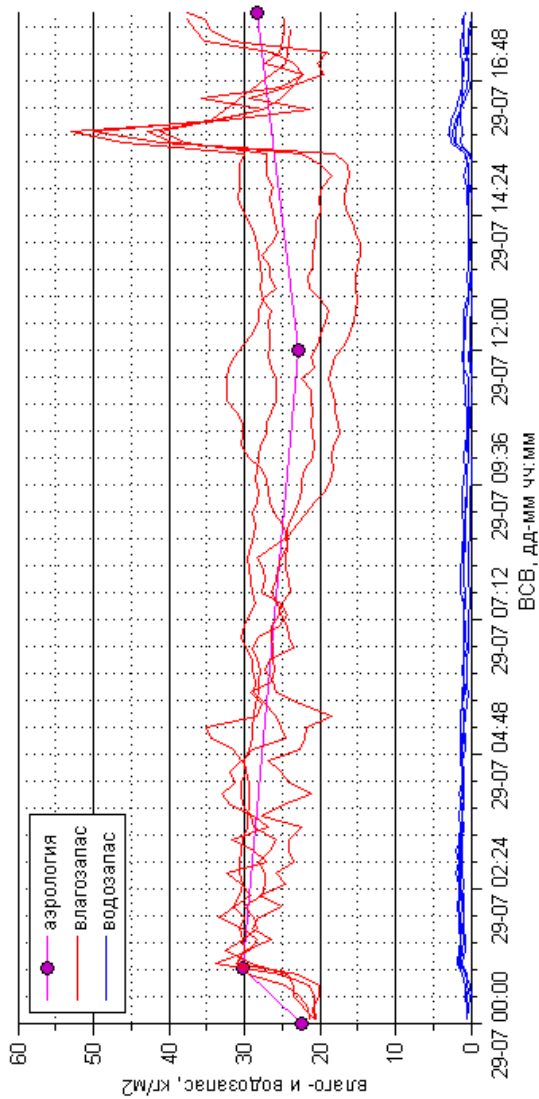


Рис. 9. Расчёт данных для четырёх РК ВЗА в сравнении с аэрологией  
 \* для удобства восприятия крайние значения по данным аэрологии  
 сдвинуты ближе

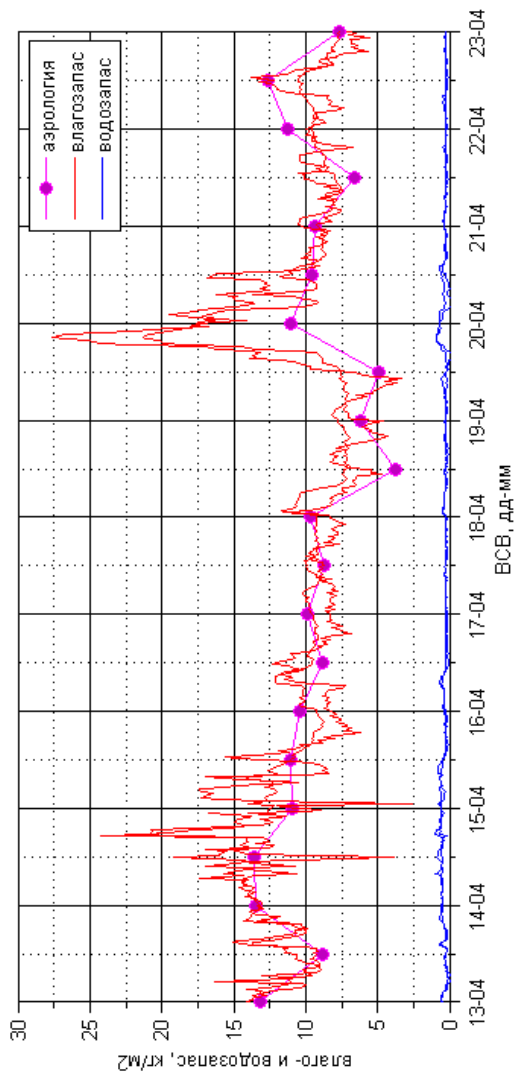


Рис. 10. Сравнение длительного ряда наблюдений РК ВЗА

При сравнении длительного ряда наблюдений двумя приборами результатов наблюдений в единицах влагозапаса с данными рассчитанными на основе аэрологического зондирования видна хорошая корреляция (рис. 10). Отсюда можно сделать вывод о незначительном влиянии погрешностей калибровки на конечный результат при использовании метода определения влагозапаса атмосферы по системе уравнений с регрессионными коэффициентами.

## Заключение

Использование отечественного и, в некоторой степени, зарубежного опыта разработки средств дистанционного определения интегрального содержания водяного пара в атмосфере и жидкокапельной влаги в облаках позволило разработать и запустить в производство относительно недорогой автоматизированный радиометрический комплекс. С появлением такого комплекса отечественного производства стало возможным начать построение метеорологической сети оперативных наблюдений влажностных характеристик атмосферы и облаков в России. Первый опыт экспериментальной работы дал возможность говорить о достаточном качестве исполнения начальной серии радиометрических комплексов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Рабинович Ю. И., Щукин Г. Г.* (1968). Определение содержания водяного пара в атмосфере по измерению микроволнового излучения. Труды ГГО. Вып. 222. С. 98—123.

*Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю.* (1987). Радиолокация в метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат. 280 с.

*Рыбаков Ю. В.* (2014). VII Всероссийский метеорологический съезд. Санкт-Петербург. Тезисы докладов.

*Дроздов Д. В., Семёнов Е. А.* (2013) Проект и некоторые наработки новой сети СВЧ радиометрических наблюдений влажностных характеристик атмосферы. / В сб.: Конференция молодых специалистов по проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды, 4—6 июня 2013 г, ФГБУ «НПО «Тайфун»: Тез. докл. – Обнинск: ВНИИГМИ—МЦД.

*Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н.* (1973). Радиотелескопы и

радиометры. / Под ред. Д. В. Королькова. — М.: Наука. 416 с.

*Шукин Г. Г.* (1985) Дистанционное определение влаго- и водозапаса атмосферы на основе применения методов пассивной и пассивно-активной радиолокации. дисс д-ра физ.-мат. наук. — Л.: ГГО. 568 с.

*Westwater E. R., Suider J. B., Falls M. J.* (1990). Ground-Based Radiometric Observations of Atmospheric Emission and attenuation at 20.6, 31.65 and 90 GHz: A comparison of Measurements and Theory. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. V. 38. № 10. P. 1569—1580.

*Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A .K* (1986). Microwave remote sensing. Active and Passive. Norwood, MA: Artech House Inc.

УДК 519.246.8 + 519.254

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСКРЕТНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЗНАЧЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

*Д. С. Ефременко, О. С. Сероухова*

ФГБОУ ВПО Российский государственный гидрометеорологический  
университет

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

E-mail: serouhova@inbox.ru

Поступила в редакцию 20.12.2015...

Поступила после доработки 8.02.2016

В настоящее время идет повсеместная замена на метеостанциях ранее используемых средств измерения на автоматические метеорологические станции (АМС) и автоматизированные метеорологические комплексы (АМК). Данные от таких станций становятся основным источником информации с наземных наблюдательных систем. По состоянию на конец 2014 г. на метеорологической сети Росгидромета находилось в эксплуатации 1813 АМК и АМС, из них 1530 АМК были установлены на станциях с персоналом, 8 АМК переведены в автоматический режим и 275 АМС функционируют без персонала (Гаврилова и др., 2015).

Помимо АМС сети Росгидромета для метеорологического обеспечения различных отраслей хозяйственной деятельности в настоящее время функционирует большое количество специализированных АМС: аэродромных, дорожных, лесных, экологических и др. Каждая из перечисленных специализированных АМС имеет как общие, так и свойственные только этому типу, измерительные системы и методики проведения наблюдений (Восканян и др., 2015). Общая особенность всех АМС состоит в том, что в процессе своего функционирования они формируют временные ряды метеорологических величин, имеющие самую разнообразную

структуру и, что не маловажно, весьма малую дискретность опроса датчиков: до 10—20 с. Такая особенность получения метеорологической информации позволяет формировать временные ряды с малой дискретностью, что делает важным исследование свойств таких временных метеорологических рядов по сравнению с теми, которые формировались ранее, например, по данным неавтоматизированных метеорологических станций. Дискретность наблюдений здесь обычно составляла 3 ч.

Влияние дискретности на вид временного ряда можно достаточно просто проиллюстрировать путем построения соответствующего графика. В качестве примера на рис. 1 приведены два временных ряда относительной влажности воздуха с дискретностью измерений в 15 мин и 60 мин. Анализ кривых на рис. 1 наглядно демонстрирует, что уменьшение дискретности приводит к сглаживанию временной изменчивости, к изменению положения локальных минимумов и максимумов. Все это, в свою очередь, может приводить и к изменению значений статистических характеристик временного ряда при изменении дискретности содержащихся в нем измерений.

В статье приводятся результаты исследования влияния величины дискретности измерения ( $\Delta t$ ) температуры воздуха, атмосферного давления и относительной влажности воздуха на величину таких статистических характеристик временных рядов как средние значения ( $M_0$ ), средние квадратические отклонения (СКО), коэффициент вариации, асимметрия ( $As$ ) и эксцесс ( $Ex$ ), вид эмпирической функции распределения. При этом в процессе формирования временных рядов с разной дискретностью не проводились операции осреднения — каждый временной ряд строился простым выбором через нужные промежутки времени данных из ряда с меньшей дискретностью (дискретность исходного ряда всегда равнялась 10 с). Расчеты проводились для различных сезонов и, кроме того, варьировалась длина временных рядов.

Проведенное исследование, в частности, позволяет:

— сравнить статистические характеристики временных рядов малой дискретности с аналогичными данными, но полученными при использовании стандартных (срочных) наблюдений на

метеорологических станциях и постах, проводимых до появления АМС;

— оценить квазиоптимальную дискретность, позволяющую без потери точности расчета указанных статистических характеристик уменьшить объем данных, извлекаемых из архивов с данными АМС.

Расчеты статистических характеристик проводились с использованием соотношений, достаточно подробно рассмотренных, например, в работе (Малинин, 2008).

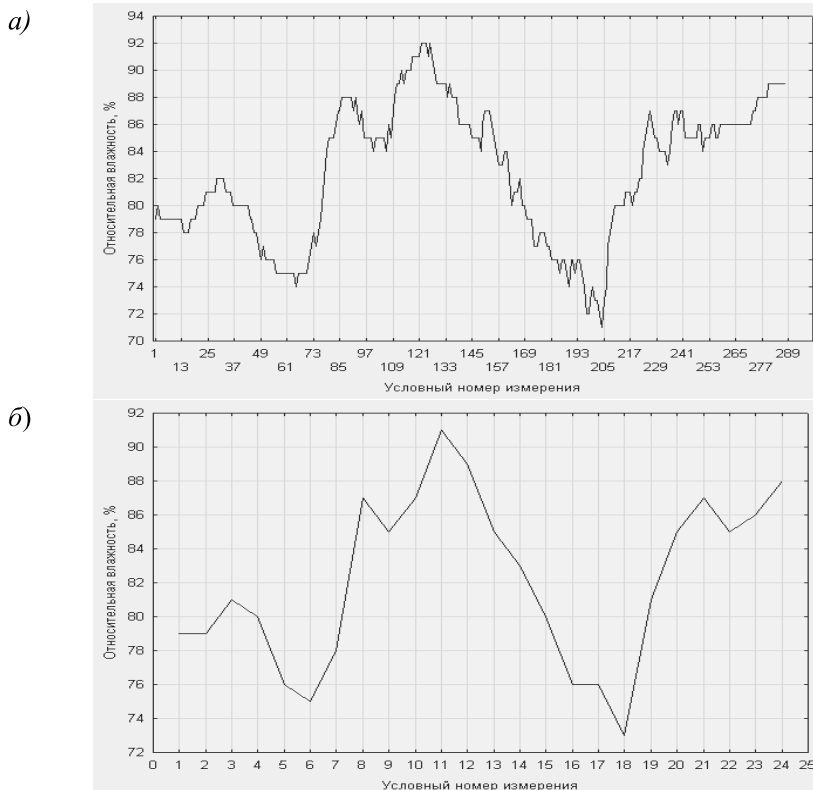


Рис. 1. Графическое представление временного ряда относительной влажности с 01. 01. 2014 СПб с различной дискретностью: *a)* за 3 суток дискретность 15 мин, *б)* за 3 суток дискретность 180 мин

## 1. Среднее значение и среднеквадратическое отклонение

Анализ результатов расчета статистических характеристик показал, что как средние значения, так и среднеквадратические отклонения для временных рядов температуры, относительной влажности и атмосферного давления длительностью более 1 суток в диапазоне дискретности измерений от 10 с до 180 мин для всех сезонов практически не меняют своей величины (выявленные изменения статистически не значимы). В табл. 1 в качестве примера приведены результаты расчетов с использованием 7 суточных временных рядов температуры воздуха для 4 сезонов.

Таблица 1

Статистические характеристики временных рядов температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) за январь, май, июль и октябрь за 7 суток 2014 года

$\Delta\tau$ , мин	Январь		Май		Июль		Октябрь	
	Мо	СКО	Мо	СКО	Мо	СКО	Мо	СКО
1/6	0,5	1,9	5,3	2,2	17,2	3,2	8,8	2,5
1	0,5	1,9	5,3	2,2	17,2	3,2	8,8	2,5
5	0,5	1,9	5,3	2,2	17,2	3,2	8,8	2,5
15	0,5	1,9	5,3	2,2	17,2	3,3	8,8	2,5
30	0,4	1,9	5,2	2,2	17,1	3,3	8,8	2,5
60	0,4	1,9	5,3	2,3	17,1	3,3	8,8	2,5
120	0,4	1,9	5,3	2,3	17,1	3,3	8,8	2,6
180	0,5	1,9	5,3	2,3	17,2	3,3	8,8	2,6

С учетом однотипности получаемых результатов все остальные иллюстративные таблицы будут содержать данные лишь для одного сезона и меньшего набора дискретностей, хотя при анализе



результатов и здесь, по-прежнему, будет использоваться полный набор сезонов и дискретностей. Так, в табл. 2 представлены статистические характеристики временных рядов атмосферного давления и относительной влажности, которые иллюстрируют отсутствие влияния дискретности измерений на значения  $M_0$  и СКО.

Таблица 2

**Статистические характеристики временных рядов атмосферного давления (гПа) и относительной влажности (%) за 7 суток января и июля 2014 года**

$\Delta\tau$ , мин	Атмосферное давление, (гПа)				Относительная влажность, (%)			
	Январь		Май		Январь		Май	
	$M_0$	СКО	$M_0$	СКО	$M_0$	СКО	$M_0$	СКО
1/6	1011,8	5,6	1008,0	4,4	85,6	4,8	63,9	14,8
15	1011,8	5,5	1008,0	4,4	85,6	4,8	63,8	15,0
60	1011,9	5,5	1008,0	4,4	85,6	4,8	64,0	14,9
180	1012,0	5,4	1007,9	4,4	85,3	4,8	63,6	15,0

Данные табл. 3 позволяют сравнить статистические характеристики временных рядов температуры, относительной влажности и атмосферного давления, рассчитанных при выделении из одной и той же выборки отрезков временного ряда разной продолжительности: 7 и 14 суток. Анализ приведенных в табл. 3 данных показывает, что наблюдается зависимость значений математического ожидания и среднеквадратического отклонения от длины ряда. Однако, по-прежнему, величины рассматриваемых статистических характеристик в пределах одной длительности ряда практически не зависят от дискретности измерений  $\Delta\tau$  вплоть до значения в 180 мин. (выявленные изменения статистически не значимы).

Таблица 3

**Статистические характеристики временных рядов температуры и атмосферного давления за 14 суток и 7 суток**

Δt, мин	Температура, °С				Давление, гПа				Влажность, %			
	14 суток		7 суток		14 суток		7 суток		14 суток		7 суток	
	Мо	СКО	Мо	СКО	Мо	СКО	Мо	СКО	Мо	СКО	Мо	СКО
1/6	-1,1	4,4	0,5	1,9	1004,3	10,3	1011,8	5,6	84,8	5,2	85,6	4,8
15	-1,1	4,4	0,5	1,9	1004,4	10,4	1011,8	5,5	84,8	5,1	85,6	4,8
180	-1,1	4,4	0,5	1,9	1004,4	10,4	1012	5,4	84,7	5,0	85,3	4,8

Интересно также отметить, что и дальнейшее уменьшение длительности временного ряда не приводит к зависимости средних значений и среднеквадратического отклонения от длины временного ряда. Этот факт иллюстрируют данные табл. 4, где сравниваются данные для временных рядов продолжительностью 3 суток и 1 сутки.

Таблица 4

**Статистические характеристики временных рядов температуры и давления за 3 суток и 1 сутки**

Δt, мин	Температура, °С (за 3 суток)		Температура, °С (за 1 сутки)		Давление, гПа (за 3 суток)		Давление, гПа (за 1 сутки)	
	Мо	СКО	Мо	СКО	Мо	СКО	Мо	СКО
1/6	-1,1	1,5	0,5	1,3	1017,2	1,7	1017,3	1,2
15	-1,1	1,5	0,5	1,3	1017,3	1,7	1017,3	1,2
180	-1,1	1,6	0,7	1,2	1017,3	1,7	1017,2	1,3

Для того, чтобы визуально оценить влияние дискретности измерений на графический вид временной зависимости относительно коротких временных рядов, на рис. 2 представлены кривые для трехсуточных рядов температуры воздуха при двух дискретностях: 15 и 180 мин. Анализ представленных кривых показывает, что

увеличение интервала между измерениями даже в 12 раз позволяет не пропустить основные тенденции изменения исследуемых временных рядов. Вследствие этого практически не изменяются и рассматриваемые в этом пункте статистические характеристики этих рядов.

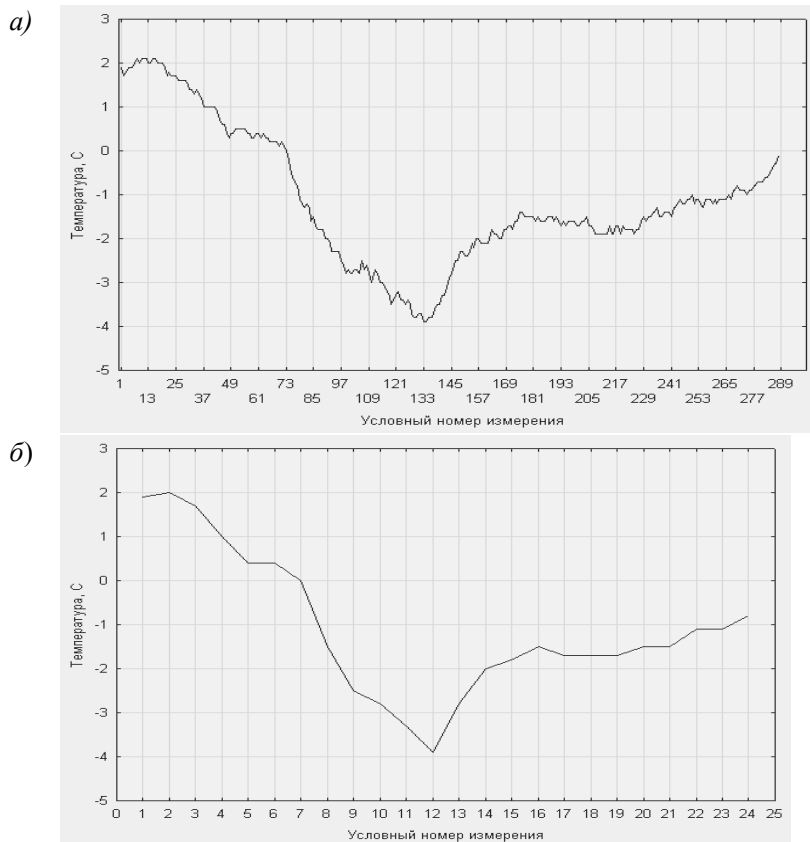


Рис. 2. Временной ряд температуры воздуха с 01. 01. 2014 СПб:  
а) за 3 суток дискретность 15 мин, б) за 3 суток дискретность 180 мин

**Вывод:** анализ всех полученных данных показал, что средние значения и средние квадратические отклонения для временных рядов рассмотренных метеорологических величин зависят от рассматриваемого сезона и длительности выборки, но при этом практически не изменяются для одной и той же выборки в диапазоне изменения дискретности измерений от 10 с до 180 мин для всех рассмотренных сезонов при продолжительности временных рядов от 1 до 14 суток. Кроме того, дополнительные расчеты показали, что и значение коэффициента вариации для температуры, атмосферного давления и относительной влажности воздуха практически не зависит от дискретности в диапазоне его изменения от 10 с до 180 мин.

## 2. Асимметрия и эксцесс

Проведенная серия расчетов показала, что как асимметрия, так и эксцесс могут менять свои значения от выборки к выборке и зависят, в свою очередь, от вида метеорологической величины, рассматриваемого сезона и объема выборки. Так, например, для 4 сезонов 2014 г. при объеме всех выборок в 7 суток изменения величины эксцесса для температуры колеблется от  $-0,6$  в январе до  $0,4$  в октябре, а значения асимметрии для тех же данных изменяются от  $-0,5$  в октябре до  $0,9$  в июле.

Полученные данные показали, что величина объема выборки влияет на значения асимметрии и эксцесса, тогда как варьирование дискретности в диапазоне от 10 с до 180 мин не дает статистически значимых изменений этих параметров.

Рассмотрим влияние сокращения длительности временного ряда на значения асимметрии и эксцесса. Анализ полученных данных показал, что при длительности временных рядов 3 и более суток изменение дискретности измерений в диапазоне 10 с — 180 мин не приводит к зависимости асимметрии и эксцесса от дискретности измерений. Однако дальнейшее сокращение длительности ряда приводит к появлению зависимости рассматриваемых статистических характеристик от дискретности, начиная со значения 60 мин.

Таблица 5

Значения асимметрии и эксцесса для временных рядов температуры, давления и влажности за 7 суток мая 2014 года

Δτ, мин	Температура, °С		Давление, гПа		Относительная влажность, (%)	
	<i>As</i>	<i>Ex</i>	<i>As</i>	<i>Ex</i>	<i>As</i>	<i>Ex</i>
1/6	0,1	-0,8	-0,5	-0,7	-0,1	-1,0
15	0,1	-0,8	-0,5	-0,7	-0,1	-1,0
180	0,1	-0,9	-0,5	-0,6	-0,1	-0,9

Так, например, для временных рядов относительной влажности длительностью 3 и 1 сутки значение асимметрии меняется от 0,7 до 1,3, а значения эксцесса: от -0,4 до 2,5. Полученный результат означает, что эмпирические функции распределения временных рядов, содержащих значения относительной влажности, также будут зависеть от той дискретности, с которой эти временные ряды получены.

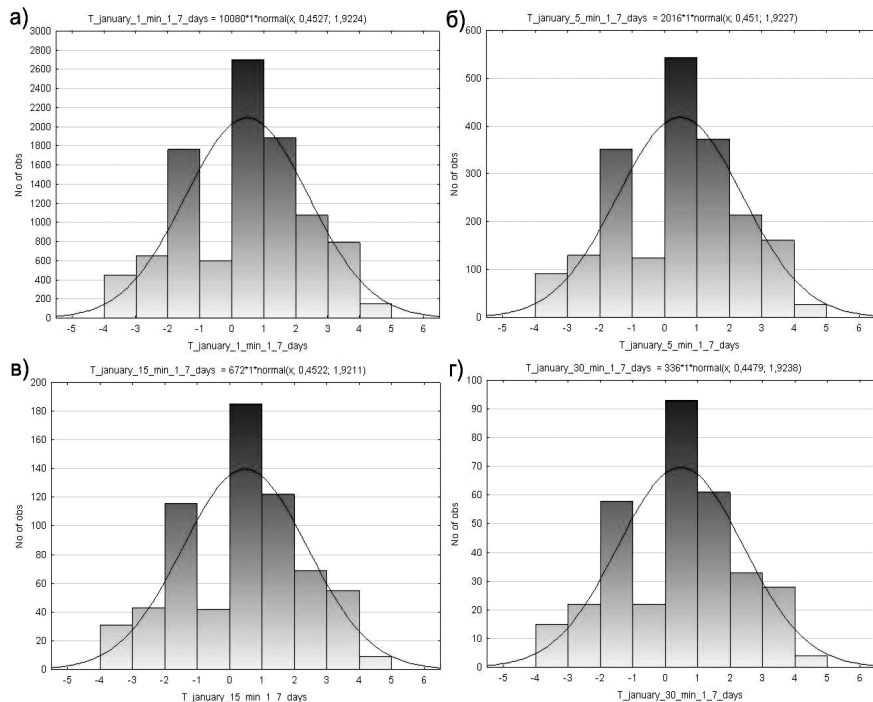
**Вывод:** проведенные расчеты показали, что с изменением дискретности в диапазоне от 10 с до 180 мин значения асимметрии и эксцесса практически не меняются при длительности рядов рассмотренных метеорологических величин в 3 и более суток. При сокращении длительности ряда зависимость от дискретности может проявляться, начиная со значения в 60 мин.

### 3. Эмпирическая функция распределения

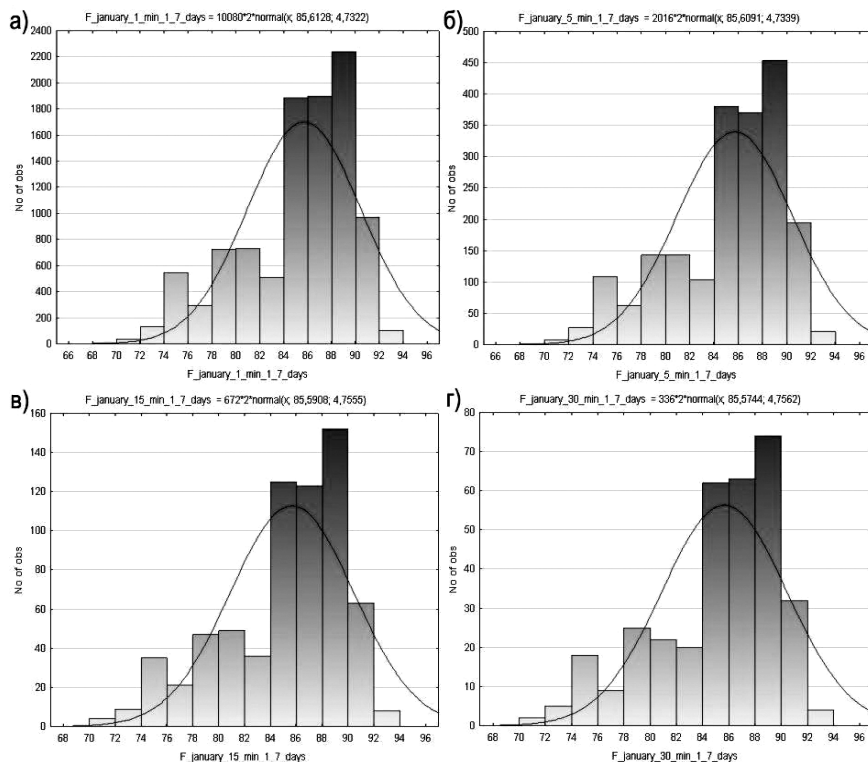
Рассмотрим влияние дискретности измерения на вид ЭФР. Как и ранее, для этого была выполнена серия расчетов для рассматриваемых метеорологических величин, при проведении которых варьировались длительность временных рядов и сезоны. Анализ полученных результатов подтвердил те данные, которые были получены при рассмотрении асимметрии и эксцесса и показал, что в диапазоне

дискретностей 1—30 мин при длительности ряда более 3 суток вид ЭФР практически не зависит от величины дискретности измерений рассмотренных метеорологических величин.

В качестве типичного примера результатов, полученных на этом этапе исследования, позволяющего выполнить визуальный анализ гистограмм, рассмотрим данные рис. 3. Протяженность всех временных рядов, использованных для построения приведенных здесь гистограмм, составила 7 суток. Представлены 2 блока гистограмм. Каждый блок содержит 4 гистограммы, построенных соответственно для дискретности измерений 1 (а), 5 (б), 15 (в) и 30 (г) мин. На каждой гистограмме приведена кривая нормального распределения, рассчитанная по этой гистограмме.



1) температура, январь



2) относительная влажность, январь

Рис. 3. Гистограммы распределения значений температуры воздуха (1) и относительной влажности (2). Пояснения в тексте.

Визуальный анализ приведенных гистограмм показывает, что действительно в пределах рассмотренных дискретностей вид ЭФР практически не меняется. При этом вид ЭФР подвержен сильной изменчивости для различных сезонов и различных метеорологических величин.

**Вывод:** в диапазоне дискретности измерений 1—30 мин и временной протяженности выборок до 7 суток дискретность измерений не влияет на вид ЭФР. При этом следует учесть

результаты, полученные при сокращении длительности ряда до 1 суток. Для таких коротких временных рядов можно ожидать зависимость вида ЭФР от величины дискретности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Гаврилова С. Ю., Иванова Т. А., Луцько Л. В., Мясникова О. А.* (2015). Итоги состояния и функционирования автоматизированной метеорологической и актинометрической сетей в 2014 году // Труды ГГО. Вып. 577. С. 7—33.

*Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С.* (2015). Автоматические метеорологические станции. Часть 1. Тактико-технические характеристики / Учебное пособие. — СПб: РГГМУ. 127 с.

*Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С.* (2015). Автоматические метеорологические станции. Часть 2. Цифровая обработка данных автоматических метеорологических станций. / Учебное пособие. — СПб: РГГМУ. 80 с.

*Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е.* (2013). К вопросу о выделении аддитивных составляющих временного ряда приземной температуры воздуха // Ученые записки РГГМУ. № 32. С. 55—65.

*Малинин В. Н.* (2008). Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. — СПб: РГГМУ. 407 с.



**ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ВЛАГИ,  
ДОСТУПНЫХ ПРИ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ  
НА КОНВЕКТИВНЫЕ ОБЛАКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО РЕАГЕНТА**

*И. Н. Русин<sup>2</sup>, Ю. А. Довгалюк<sup>1</sup>, Н. Е. Веремей<sup>1</sup>, А. Л. Казанин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова  
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7  
E-mail: dovgaluk35@mail.ru,  
veremey@gmail.com,  
akazanin@yandex.ru,

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
198262 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 10-я линия, 33

Поступила в редакцию 10.08.2015  
Поступила после доработки 6.02.2016

**Введение**

Проблема воздействия на атмосферные процессы с целью обеспечения благоприятных условий для жизнедеятельности человека или предотвращения ущерба от опасных явлений погоды становится все более актуальной, ее решение представляется одной из перспективных задач метеорологии (Доклад рабочей группы..., 1957; Итоговый доклад, 1967; Шметер, Берюлев, 2005; Сталевич, 1972; Бекряев, 2007; Дрофа, 2010). Поскольку энергия атмосферных процессов несоизмеримо велика по сравнению с современной энерговооруженностью человечества, основным принципом при реализации активных воздействий (АВ) является нахождение таких моментов или этапов развития атмосферных процессов, в которые сравнительно небольшие энергетические затраты приводят к резкому изменению их характера (Мейсон, 1961; Шишкин, 1964; Качурин, 1973). Это возможно при неустойчивости процессов. На реализации

такой неустойчивости построен основной принцип активных воздействий на облака.

Изучение ресурсов облачной влаги в связи с решением задачи активных воздействий на конвективные облака с целью искусственного регулирования осадков было начато еще в 1970-х годах (Чуваев и др., 1964; Швер, 1976; Шишкин, 1981). Количественное определение облачных ресурсов проводилось на основе самолетной и наземной метеорологической информации (Кондратова, 1968). В отдельных работах применялись данные, полученные с помощью радиолокаторов и спутников (Ватьян, Ломидзе, 1987).

Исследования термической структуры и микроструктуры конвективных облаков, не дающих осадки в естественных условиях, показали, что при достаточно высокой температуре на уровне их нижней границы эти облака имеют обширную область с положительными температурами и капельным строением, а, следовательно, и большой водозапас. Оценить перспективность облака для возможного получения осадков можно по данным расчетов с использованием численных нестационарных моделей различного типа.

В данной работе решается задача оценки ресурсов облачной влаги, доступных при активных воздействиях гигроскопическим реагентом, а объектом исследования являются конвективные облака.

## **1. Методика оценки облачных ресурсов**

В основу комплексной методики оценки ресурсов влаги, доступных для активных воздействий, положена концепция воздействия на облако гигроскопическим реагентом. Этот способ воздействия позволяет реализовать ресурсы влаги, накопленные в облаках, потенциально не дающих осадки, при этом он сравнительно дешев, эффективен и практически безопасен для окружающей среды. Согласно теоретическим и натурным исследованиям, ресурсными облаками признаны конвективные облака с мощностью не более 3 км и не менее 1 км (Шишкин, 1964).

Оценка ресурсов дополнительной влаги, содержащихся в конвективных облаках и доступных при засеве облаков гигроскопическим реагентом, основывается на комплексном использовании данных наземных метеорологических наблюдений, результатах моделирования развития конвективных облаков с использованием численной модели конвективного облака и климатических данных об осадках.

Методика использует:

а) данные наземных метеорологических наблюдений (для выбора дней, в которые зафиксировано развитие конвективных облаков);

б) данные аэрологического зондирования для дней, в которые развивающиеся конвективные облака не давали осадков;

в) климатические данные об осадках из конвективных облаков в анализируемый период;

г) численную нестационарную полуторамерную модель конвективного облака, разработанную в ГГО (Довгалоук и др., 2013).

На первом этапе реализации методики по данным наземных метеорологических наблюдений выбираются дни с конвективными облаками. Для каждого выбранного дня с использованием данных ежедневного радио-ветрового зондирования атмосферы проводятся расчеты по численной полуторамерной модели, по результатам которых устанавливается факт возможного выпадения осадков из конвективных облаков. Очевидно, что в эту категорию попадают и облака, которые и сами по себе давали осадки в исследуемый период. Таким образом устанавливается количество дней, в которые дождь выпадал по естественным причинам, и количество дней, к которым осадки могли быть вызваны искусственно.

Порядок применения данной методики рассмотрен на примере двух регионов России: Ленинградской и Ростовской областей, которые различаются между собой физико-географическими и климатическими условиями.

В таблице 1 приведены данные о числе дней с осадками в Санкт-Петербурге и Ростове-на-Дону, зафиксированными по данным метеорологических наблюдений с мая по сентябрь за период 2006—2010 гг.

Таблица 1

**Число дней с дождем за период 2006—2010 гг.  
(по данным наземных измерений)**

Пункт	Месяц					Всего
	V	VI	VII	VIII	IX	
	<i>2006</i>					
Санкт-Петербург	12	8	7	8	8	43
Ростов-на-Дону	10	8	7	3	6	34
	<i>2007</i>					
Санкт-Петербург	10	10	8	12	16	55
Ростов-на-Дону	5	7	3	4	8	27
	<i>2008</i>					
Санкт-Петербург	5	16	11	18	9	59
Ростов-на-Дону	10	7	6	2	7	33
	<i>2009</i>					
Санкт-Петербург	8	15	12	18	16	69
Ростов-на-Дону	11	2	7	7	5	31
	<i>2010</i>					
Санкт-Петербург	15	14	5	11	15	60
Ростов-на-Дону	12	5	8	2	4	31

Из таблицы следует, что в Ростове-на-Дону число дней с дождем примерно в два раза меньше, чем в Санкт-Петербурге, что говорит о меньшем увлажнении данной территории за счет осадков из облаков.

Для дней с конвективными облаками, полученными по данным наблюдений, с помощью численной модели определяются дни (их количество), в которые могут выпадать осадки.

С учетом дней, когда в реальных условиях выпадал дождь, можно получить количество дней, в которые можно получить дополнительные осадки, используя гигроскопический реагент. Данные о количестве таких дней с ресурсными облаками приведены в таблице 2 для Санкт-Петербурга и Ростова-на-Дону.

Таблица 2

**Число дней с конвективными облаками, пригодными для активных  
воздействий гигроскопическим реагентом, которые в естественном  
развитии не дают осадков**

Пункт	Месяц					Всего
	V	VI	VII	VIII	IX	
	<i>2006</i>					
Санкт-Петербург	4	8	15	7	6	40
Ростов-на-Дону	12	12	8	6	7	45
	<i>2007</i>					
Санкт-Петербург	12	14	12	11	11	60
Ростов-на-Дону	7	10	6	7	6	36
	<i>2008</i>					
Санкт-Петербург	15	13	8	7	6	49
Ростов-на-Дону	10	9	10	2	2	33
	<i>2009</i>					
Санкт-Петербург	12	8	10	6	9	45
Ростов-на-Дону	11	14	9	9	4	47
	<i>2010</i>					
Санкт-Петербург	9	12	15	8	7	51
Ростов-на-Дону	11	14	9	4	4	42

На диаграмме (рис. 1) на примере Ленинградской области представлено число дней с конвективными облаками, дающими осадки при естественном развитии облака (темный цвет) и число дней с конвективными облаками, осадки из которых могут быть вызваны при активном воздействии (серый цвет).

Ленинградская область, находясь в зоне достаточного увлажнения, имеет ресурсы дополнительной влаги, которая может быть получена при активных воздействиях на конвективные облака, не дающие осадков. Число дней с ресурсными облаками меняется от года к году; за рассмотренный период колеблется от 60 до 40 дней.

Работы по модификации режима осадков предоставляют возможности не только для увеличения (уменьшения) их количества,

но и для обеспечения их выпадения в определенном месте в нужный день. Хотя облачные ресурсы для активных воздействий в Ленинградской области имеются, но ввиду достаточности увлажнения вопрос об экономической целесообразности их использования в регионе должен прорабатываться дополнительно.

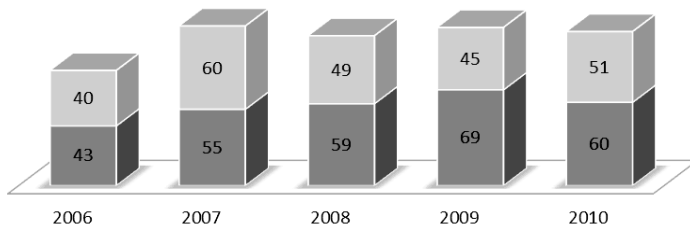


Рис. 1. Число дней с конвективными облаками, дающими осадки при естественном развитии (темный цвет) и с облаками, пригодными для активного воздействия (светлый цвет). Май—сентябрь 2006—2010 гг.

## 2. Результат количественной оценки эффекта активного воздействия для Ростова-на-Дону

Наибольший практический интерес для искусственного регулирования осадков представляют районы с недостаточным естественным увлажнением, например Ростовская область, находящаяся в степной зоне России, где активные воздействия на облака могут быть полезными ввиду явного недостатка влаги и частых засух.

Для оценки возможного эффекта воздействия используются количественные характеристики осадков: заимствованные из климатических справочников данные о среднемесечном и среднесуточном количестве осадков (таблица 3).

Таблица 3

**Среднемесячное и среднесуточное количество осадков (мм)  
в Ростове-на-Дону за теплый период 1988—2010 гг.**

Месяц	Количество осадков, мм	
	среднемесячное	среднесуточное
Май	18	2,0
Июнь	24	2,6
Июль	26	1,9
Август	25	1,7
Сентябрь	20	1,8

Количество дополнительных осадков приблизительно оценивается по данным о числе дней с облаками, пригодными для активных воздействий гигроскопическим реагентом, и среднему за несколько лет среднесуточному количеству осадков.

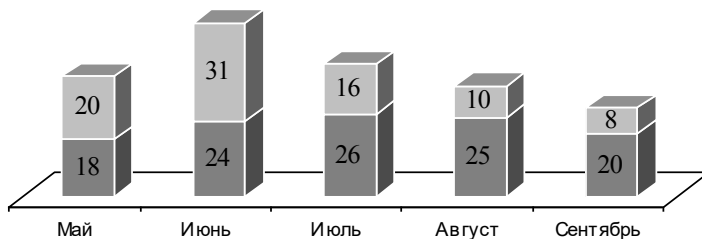


Рис. 2. Количество осадков (мм) в Ростовской области: среднее за период 1988—2010 гг. — темные столбцы, возможное дополнительное при применении АВ — светлые столбцы.

Оценки, приведенные на рис. 2 и 3, показывают, что путем активных воздействий на территории Ростовской области можно увеличить суммарное количество осадков практически в 2 раза.

На территории Ростовской области конвективные облака содержат значительные запасы воды, пригодные для искусственного

увеличения осадков. Использование гигроскопических реагентов позволяет их реализовать. Оценка экономического эффекта работ по воздействию, особенно с точки зрения сельского хозяйства, требует дополнительного исследования.

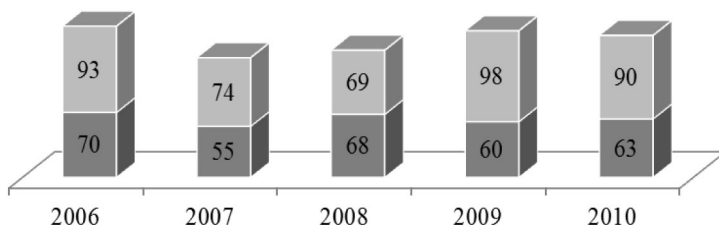


Рис. 3. Количество осадков (мм) за теплый сезон в Ростовской области: реально наблюдаемое — темные столбцы, возможное дополнительное при применении АВ — светлые столбцы.

## Заключение

Из полученных в статье оценок следует, что регионы обладают различными запасами облачных ресурсов для регулирования осадков методами АВ с использованием гигроскопических реагентов. Выполненные оценки показали, что количество осадков может быть значительно (до 2-х раз) увеличено, что особенно важно для районов с недостаточным естественным увлажнением.

Следует дополнительно оценить экономическую целесообразность работ по АВ для каждого региона. Оценка облачных ресурсов в комплексе с экономическими оценками позволяет определить пригодность региона для организации и проведения работ по искусственному регулированию осадков из облаков.



*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 15-05-05719-а; 15-55-45026 ИНД\_а, 16-05-00197а).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бекряев В. И.* (2007). Некоторые вопросы физики облаков и активных воздействий на них. — СПб: Изд. РГГМУ. 335 с.

*Ватьян М. Р., Ломидзе Н. Э.* (1987). Исследование ресурсов поля облачности по данным ИСЗ / В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. — ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, 1987. — 176 с.

*Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А.* (2013). Применение полутрамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. — СПб: Изд. Моби-Дик, 218 с.

Доклад рабочей группы Аэрологической комиссии «Искусственное воздействие на облака и осадки» (перевод с англ.) (1957). — Л.: Гидрометеоздат. 86 с.

*Дрофа А. С.* (2010). Исследование воздействия гигроскопическими частицами на теплое конвективное облако по результатам численного моделирования // Известия РАН. ФАО. Т. 46. № 3. С. 357—367.

Итоговый доклад по модификации погоды и климата комитета по атмосферным исследованиям «Модификация погоды и климата. Проблемы и перспективы» (1967). — Л.: Гидрометеоздат. 100 с.

*Качурин Л. Г.* (1973). Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеоздат. 369 с.

*Кондратова А. В.* (1968). Оценка водозапасах переохлажденных облаков слоистых форм, не дающих осадки // Труды ИЭМ. Вып. 3. С. 44—54.

*Мейсон Б. Дж.* (1961). Физика облаков. — Л.: Гидрометеоздат. 538 с.

*Сталевиц Д. Д.* (1972). Вызывание искусственных осадков с помощью гигроскопических веществ // Труды ГГО. Вып. 278. С. 3—19.

*Чуваев А. П., Оренбургская Е. В., Осипова Г. И., Шварц В. Т.* (1964). К методике оценки климатических ресурсов из конвективных облаков // Труды ГГО. Вып. 156. С. 32—48.

*Швер Ц. А.* (1976). Атмосферные осадки на территории СССР. — Л.: Гидрометеоздат. 302 с.

*Шишкин Н. С.* (1964). Облака, осадки и грозное электричество. — Л.: Гидрометеоздат. 440 с.

*Шишкин Н. С.* (1981). К расчету водозапаса конвективных облаков над большими территориями // Труды ГГО. Вып. 439. С. 11—16.

*Шметер С. М., Берюлев Г. П.* (2005). Эффективность искусственной модификации облаков и осадков с помощью гигроскопических аэрозолей // Метеорология и гидрология. № 2. С. 43—59.

**РОЛЬ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ В ИЗМЕНЕНИИ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО  
ПОЛУОСТРОВА В XX ВЕКЕ – НАЧАЛЕ XXI ВЕКА**

*Р. В. Горбунов<sup>1,2</sup>, Т. Ю. Горбунова<sup>1</sup>, П. С. Калиновский<sup>1,2</sup>,  
Н. К. Кононова<sup>3</sup>, О. А. Миронюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Таврическая академия ФГАОУ ВО «Крымский федеральный  
университет имени В.И. Вернадского»  
295007 Республика Крым, Симферополь, пр. академика Вернадского, 4

<sup>2</sup> Научно-образовательный центр ноосферологии  
и устойчивого ноосферного развития  
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет  
имени В.И. Вернадского»  
295007 Республика Крым, Симферополь, пр. академика Вернадского, 4

<sup>3</sup> Институт географии Российской академии наук,  
119017 Москва, Старомонетный пер., 29  
e-mail: NinaKononova@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.04.2015  
Поступила после доработки 21.01.2016

**Введение**

Крымский полуостров характеризуется обратной широтной зональностью, связанной с барьерным влиянием гор. Это обстоятельство является причиной различий в пространственно-временной дифференциации температурных полей, связанной с инсоляционной и циркуляционной позицией Крымских гор. Роль инсоляции на территории полуострова вполне понятна и чётко дифференцирована по экспозициям (склоны южной и западной экспозиции получают больше солнечной радиации, чем склоны западной и восточной экспозиций) (Боков, Горбунов, 2011; Смирнов,

2009). Роль же циркуляции атмосферы затрагивалась лишь в общих чертах — исследователи как правило ограничивались описанием синоптических процессов над полуостровом, говоря при этом о сезонных погодных отличиях (Климат и опасные..., 1982, Подгородецкий, 1988; Современные ..., 2009), не делая поправку на то, что на протяжении XX века произошла смена нескольких циркуляционных эпох над территорией Северного полушария (Дзедзеевский, 1956; Кононова, 2014). В работах О. В. Парубец (Парубец, 2009; Парубец, Калиновский, 2009) сделана попытка связать изменения температуры воздуха с выделенными ею периодами землепользования в Крыму, с изменением площадей орошаемых земель. Кроме того, О. В. Парубец совместно с А. В. Холопцевым дан анализ температурных рядов по нескольким метеостанциям Крымского полуострова и сделана попытка прогнозирования изменения температуры воздуха в Крыму (Холопцев, Парубец, 2014а; Холопцев, Парубец, 2014б). Н. К. Кононова (2014) описала роль групп циркуляции в изменении сезонной температуры воздуха в г. Симферополь.

Указанные работы интересны и раскрывают влияние тех или иных факторов на изменение температуры воздуха в Крыму. Однако эти работы не позволяют количественно оценить степень воздействия циркуляционных процессов на формирование температурных аномалий, и, в конечном итоге, на формирование многолетних климатических норм. В связи с этим целью данного исследования стало определение степени влияния циркуляции атмосферы на формирование температуры воздуха на территории Крымского полуострова.

### **Материал и методика исследований**

Влияние циркуляции атмосферы на формирование климатических норм может рассматриваться в двух аспектах: в аспекте пропорции циркуляционного вклада (по В. М. Фёдорову (2011)) и в аспекте степени и устойчивости этого влияния.

Для описания влияния циркуляции атмосферы на формирование климатических норм температуры воздуха и температурных аномалий использовалась классификация элементарных циркуляционных механизмов, предложенная Б. Л. Дзердзеевским с соавторами (Дзердзеевский с соавт., 1946; Дзердзеевский, 1948). В типизации выделяется 41 элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ), которые различаются между собой направлением и количеством одновременных арктических вторжений (блокирующих процессов) и выходов южных циклонов на полушарии. С определённым типом ЭЦМ в каждом районе связаны характерные для этого типа ЭЦМ погодные (синоптические) условия с соответствующими температурными показателями. Именно это позволяет на основании типизации циркуляционных механизмов анализировать влияние циркуляции атмосферы на формирование температурных аномалий.

По направлению перемещения барических образований на полушарии ЭЦМ объединены в 4 группы циркуляции: зональную (без блокирующих процессов), нарушения зональности (один блокирующий процесс на полушарии), меридиональную северную (2—4 блокирующих процесса и столько же выходов южных циклонов) и меридиональную южную (циклоническая циркуляция над Арктикой без блокирующих процессов, 2—4 выхода южных циклонов на полушарии) (табл. 1). Каждый ЭЦМ длится несколько дней. Смена одного ЭЦМ другим с 1 января 1899 г. фиксируется в Календаре последовательной смены ЭЦМ. ([atmospheric-circulation.ru](http://atmospheric-circulation.ru)).

Важной особенностью этой типизации является наличие динамических схем на каждый тип ЭЦМ, поэтому, характеризуя состояние циркуляции атмосферы над внетропическими широтами всего Северного полушария, она позволяет отслеживать перемещение барических образований в конкретном регионе.

Анализ отклонений суммарной годовой продолжительности меридиональной северной, меридиональной южной и обобщенной зональной групп циркуляции позволил выявить длительные (в несколько десятилетий) периоды положительных аномалий продолжительности какой-либо группы циркуляции. Эти периоды получили название циркуляционных эпох (Дзердзеевский, 1956).

Таблица 1

**Характеристика групп циркуляции атмосферы Северного полушария в типизации Б. Л. Дзердзеевского (Кононова, 2009)**

Группа циркуляции	Типы ЭЦМ, входящие в группу	Атмосферное давление в Арктике	Количество блокирующих процессов	Количество выходов южных циклонов
Зональная (З)	1 и 2	Высокое	0	2–3
Нарушения зональности (НЗ)	3–7	Высокое	1	2–3
Меридиональная северная (МС)	8–12	Высокое	2–4	2–4
Меридиональная южная (МЮ)	13	Низкое	0	3–4

С 1899 г. на Северном полушарии сменились три циркуляционные эпохи (рис. 1): две меридиональные (с 1899 по 1915 гг. и с 1957 г. по настоящее время) и одна зональная (1916–1956 гг.).

Пропорция циркуляционного вклада рассчитывалась по среднемесячным значениям согласно методике, предложенной В. М. Фёдоровым (2011). В основу расчётов были положены официальные данные по температуре воздуха на крымских метеостанциях за весь период инструментальных наблюдений, полученные в Центральной геофизической обсерватории МЧС Украины (г. Киев). Для имеющихся за определенный период (1899—2013 гг.) рядов инструментальных наблюдений по 23 метеостанциям Крымского полуострова рассчитывались отклонения от среднего многолетнего значения (аномалии). Далее определялась пропорция вклада каждого ЭЦМ в формирование величины и знака аномалии.

По данным Календаря последовательной смены ЭЦМ ([atmospheric-circulation.ru](http://atmospheric-circulation.ru)) определялась продолжительность действия каждого типа

ЭЦМ в пределах каждой циркуляционной эпохи. После этого по данным выборки рассчитывалась среднемесячная продолжительность (в сутках) действия отдельных типов ЭЦМ для случаев с положительной и отрицательной аномалией.

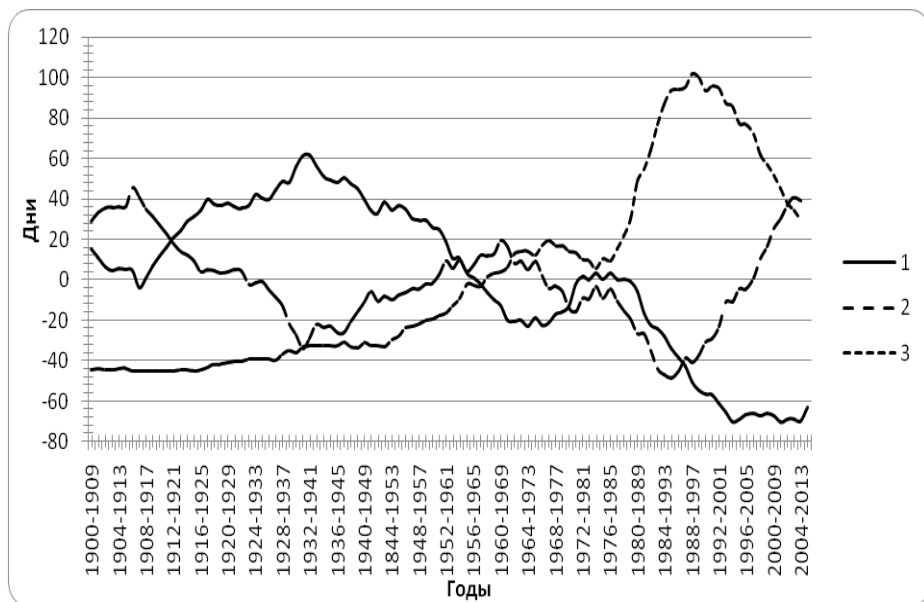


Рис. 1. Отклонения продолжительности групп циркуляции Северного полушария (10-летние скользящие средние) за 1899—2013 гг. от средней за тот же период:

- 1 — зональная + нарушение зональности; 2 — меридиональная северная (блокирующие процессы); 3 — меридиональная южная.

Допуская, что связанные с отдельными типами ЭЦМ характеристики температуры воздуха вносят определённый вклад в формирование как положительной, так и отрицательной аномалии годовых значений температуры, для каждой циркуляционной эпохи рассчитывалась пропорция вклада (весовые отношения) каждого типа ЭЦМ в формирование температурной аномалии. Принимая сумму

продолжительности действия отдельных типов ЭЦМ для случаев с положительной и отрицательной аномалией за единицу, и, произведя деление среднемесячных значений на сумму этих значений, получаем пропорцию циркуляционного вклада каждого типа ЭЦМ в формирование положительной и отрицательной аномалии. Результатом расчётов является ряд пропорций циркуляционного вклада всех типов ЭЦМ в формирование положительной и отрицательной температурной аномалии.

Для оценки степени и устойчивости влияния ЭЦМ на формирование температурных аномалий необходимы данные по среднесуточным значениям температуры. Такие данные с достаточно длинным и непрерывным рядом в распоряжении авторов были только по метеостанциям Симферополь и Феодосия. Эти данные представлены в открытом доступе на сайте ([www.cliwage.meteo.ru](http://www.cliwage.meteo.ru)).

На первом этапе оценивали степень влияния общей циркуляции атмосферы на среднесуточную температуру. При этом влияние внутригодовой динамики оценивалось не по абсолютным значениям температуры, а по отклонению среднесуточной температуры от среднемесячной.

В дальнейшем полученные данные подвергались однофакторному дисперсионному анализу, где набор ЭЦМ рассматривали в качестве градаций организующего фактора. В качестве выборки значений результативного признака использовались выборки среднесуточных отклонений за рассматриваемую циркуляционную эпоху.

## **Результаты исследований и их обсуждение**

Анализ пропорций циркуляционного вклада позволил выявить в пределах каждой циркуляционной эпохи типы ЭЦМ, которые характеризуются наибольшей устойчивостью в формировании положительных или отрицательных температурных аномалий. Эти типы ЭЦМ были сгруппированы в таблицу 2. В таблицу занесены только те ЭЦМ, при которых на всех метеостанциях наблюдался одинаковый знак пропорции циркуляционного вклада.



**Наиболее устойчивые типы ЭЦМ по знаку пропорции циркуляционного вклада на территории полуострова Крым**

Мескип	Циркуляционные эпохи					
	меридиональная северная	зональная	меридиональная южная			
	+	+	-	+	-	-
1	16, 56, 8а, 8гз	1а, 7аз, 10а, 11в, 11г, 12г, 13з	1а, 56, 76з, 10а, 11в, 11г	16, 46, 5г, 6, 8вз, 8гз, 96, 106, 116, 126з	4а, 6 116, 11в, 126з	86з, 8гз, 13з, 13л
2	4а, 5г, 7аз, 8а, 86з, 8вз, 8гз, 96, 10а, 116, 12а, 12г	1а, 5а, 56, 76з, 11а, 11в, 126з, 13з	4а, 5а, 56, 5в, 86з, 8вз, 8гл, 11в, 13з	3, 4в, 7аз, 8а, 116, 12а, 126з	8гз, 11а, 116, 12а	56, 5в, 5г, 96, 106, 12г
3	16, 3, 46, 5а, 116, 11в, 11г, 126л	1а, 6, 76з, 86з, 8гз, 9а, 96, 10а, 106, 12вл	3, 46, 6, 10а	16, 4в, 56, 8вз, 11а, 116, 11в, 11г	1а, 6, 8вл, 96, 116, 12а, 126з, 126л	2в, 4а, 4в, 5в, 106, 11а, 11в, 12вз, 12г, 13з
4	16, 3, 46, 4в, 6, 7ал, 86з, 86л, 8вл, 9а, 10а, 11г, 126з, 12г	1а, 5в, 5г, 7аз, 76з, 76л, 8вз, 96, 106, 116, 12а, 126л, 12вз, 12вл	3, 4в, 6, 86л, 8вл, 8гл, 11в, 13з	96, 116, 12а, 126л	4а, 4в, 12а, 126з	26, 2в, 5а, 8гз, 106, 116, 11в, 11г, 12вз, 12вл
5	2в, 86з, 8вз, 8вл, 10а	26, 76л, 8гл, 106, 12г	1а, 3, 4в, 56, 8а, 106	26, 5г, 7аз, 7ал, 96, 10а, 12вл, 12г	26, 3, 6, 8вл, 12вз	86з, 86л, 8вз, 96, 106, 11а, 11г, 126з, 12г
6	26, 10а, 106, 12а	6, 8а, 86л, 126л, 12вл	7ал, 8а, 86л, 12г	2а, 3, 8гл, 12а, 126л, 12вл	2в, 6, 9а, 106, 12а	2а, 4а, 4в, 8вл, 8гл, 10а, 11г, 126з

		Циркуляционные эпохи			
Месяц	меридиональная северная		зональная		меридиональная южная
	+	-	+	-	
7	2б, 6, 7ал, 8бл, 8гл, 10а, 12а, 13л	2а, 3, 8вл, 9а, 10б	2б, 4в, 8гл, 12а, 12вл, 13л	2а, 3, 9а, 10б	9а, 12бл, 12г, 13л
8	3, 4б, 10б	2а, 8а, 9а, 12бл	1а, 5б, 7бл, 10а	2а, 2б, 4б, 7ал, 8а	3, 9а, 12а, 12бз, 12бл
9	1а, 4в, 5б, 5в, 7ал, 8бз, 8бл, 10а, 11в, 13л	2б, 4б, 7аз, 7бз, 7бл, 12а, 12бл, 12вл, 12г	1а, 1б, 2б, 2в, 4а, 4в, 5б, 5в, 5г, 6, 7аз, 8а, 8гз, 10а, 11б, 12а, 13л	4б, 7ал, 7бз, 7бл, 8вл, 8гл, 11в, 11г, 12вз, 12вл, 12г	5в, 7бл, 8гз, 8гл, 9а, 9б, 12а
10	1а, 3, 5а, 6, 7бз, 8бл, 8гл, 9а, 12а, 12бл, 12г	1б, 7ал, 8а, 8бз, 8вз, 8вл, 8гз, 10б, 11б, 11г	4в, 5б, 5в, 6, 7бз, 9б, 10б, 12бз, 12г	4а, 4б, 5а, 8а, 8вл, 8гз, 10а, 11в, 12а, 12вз	4в, 6, 7бз, 8гз, 9а, 12а, 12бз, 12бл, 12г
11	7аз, 7бз, 8а, 8гл, 10а, 10б, 11б, 12а	5г, 8бз, 11а, 13з	3, 5г, 8вз, 8гз, 9б, 11а, 11б, 11в, 12а, 12вл	1а, 4а, 5б, 7аз, 9а, 10а, 11г, 13з	5б, 8бл, 8вз, 8гз, 11б, 12а, 12бз, 12вз
12	6, 11в, 12бз, 12г	1а, 4а, 5г, 8бз, 8гз, 12вз	5а, 8а, 8гз, 10б, 11б, 11г, 12бз, 12г	7аз, 8вз, 11а, 11в, 12а, 12вз	3, 4в, 5а, 5б, 5в, 12бз, 12вл
					1б, 2а, 2б, 3, 4а, 4б, 5г, 7бл, 8бл, 8вл, 11а, 11б, 11г, 1б, 2б, 4а, 4б, 5а, 5г, 7бл, 8а, 8бз, 8бл, 9б, 10а
					1а, 2а, 2б, 4а, 5а, 5б, 5г, 7бл, 8бз, 8вз, 10а, 11в, 13л
					1а, 3, 4б, 6, 7бл, 8вл, 8гл, 9а, 9б, 9а, 11в, 12бл
					4а, 2а, 4б, 5а, 5б, 5г, 5в, 5г, 7бл, 8бз, 8вз, 10а, 11в, 13л
					1а, 3, 4б, 6, 7бл, 8вл, 8гл, 9а, 9б, 9а, 11в, 12бл
					4а, 4б, 5а, 5б, 5г, 5в, 5г, 7бл, 8бз, 8вз, 10а, 11в, 13л
					1а, 3, 4б, 6, 7бл, 8вл, 8гл, 9а, 9б, 9а, 11в, 12бл
					4а, 4б, 5а, 5б, 5г, 5в, 5г, 7бл, 8бз, 8вз, 10а, 11в, 13л



климатических аномалий при смене эпох. Как видно из рис. 3 и 4, меридиональная северная циркуляционная эпоха характеризуется минимальной амплитудой значений коэффициента Н. А. Плохинского.

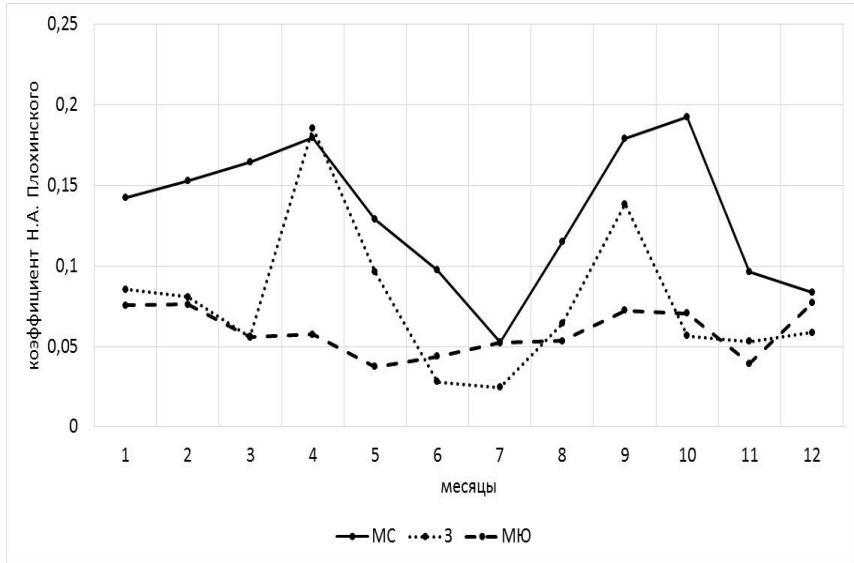


Рис. 3. Внутригодовая динамика степени влияния общей циркуляции атмосферы на формирование температурных аномалий по данным метеостанции Феодосия.

При этом отмечается смещение максимумов влияния общей циркуляции атмосферы на формирование температурных аномалий в зональную циркуляционную эпоху с февраля и октября на апрель и сентябрь при сильном сглаживании пиков в меридиональную южную циркуляционную эпоху. Минимум степени влияния общей циркуляции атмосферы сместился с июля на май — июнь (рис. 3, 4).

Причиной относительно небольшого влияния общей циркуляции атмосферы может быть неодинаковая степень влияния отдельных типов ЭЦМ на исследуемый показатель. В связи с этим представляет отдельный интерес выделение наиболее сильно влияющих на температуру типов ЭЦМ.

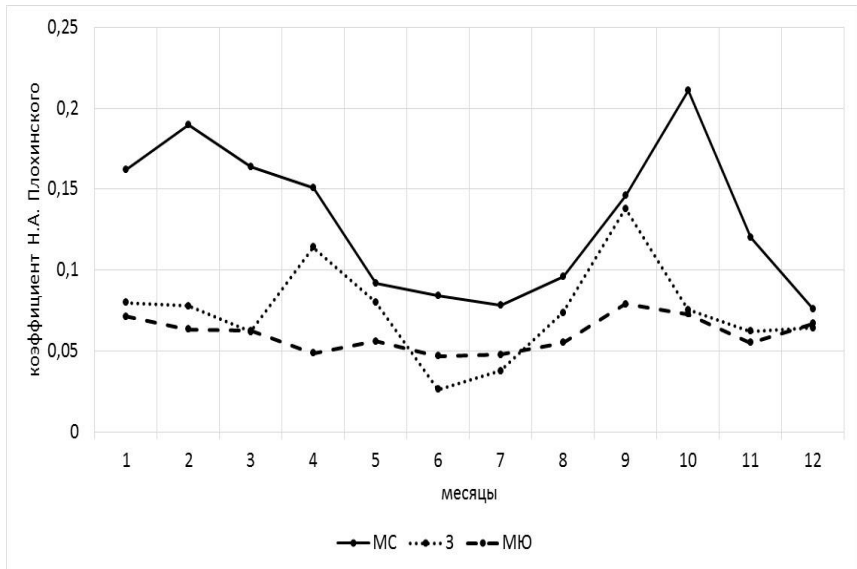


Рис. 4. Внутригодовая динамика степени влияния общей циркуляции атмосферы на формирование температурных аномалий по данным метеостанции Симферополь.

Для этого устанавливали среднюю степень влияния каждого типа ЭЦМ на среднесуточную температуру (ее отличие от среднемесячной для каждого месяца в течение отдельной циркуляционной эпохи), и сравнивали с собственной ошибкой. Полученные показатели были отнесены к 3 категориям: А) неустойчивое влияние (ошибка среднего достоверно больше среднего); Б) устойчивое влияние (среднее достоверно больше своей ошибки); В) промежуточное влияние. Процедура их сравнения принималась аналогичной процедуре проверки гипотезы о равенстве генеральных дисперсий. Для признания различий достоверными соотношение сравниваемых величин должно было превысить табличное значение критерия Фишера.

Физический смысл определения устойчивости влияния заключается в том, что для устойчивого влияния можно утверждать, что в данном месяце данный тип ЭЦМ будет давать отклонения от среднемесячной температуры одного и того же знака; в то же время неустойчивое влияние, когда средняя аномалия температуры для данного типа ЭЦМ близка к нулю, при достаточно большой ошибке означает, что, хотя влияние может быть достаточно большим в каждом конкретном случае, его знак трудно предсказуем. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 3.

Анализируя конкретные случаи влияния типов ЭЦМ на формирование температурных аномалий, можно выделить следующие особенности: для первой циркуляционной эпохи (1899—1915 гг.) характерно наличие типов ЭЦМ с устойчивым влиянием в весенний и осенний периоды. К типам ЭЦМ, достоверно повышающим температуру, относятся ЭЦМ 1а, 1б, 2а, 4а, 5б, 8вл, 8вз, 9а. В свою очередь, типы ЭЦМ 2в, 4в, 5в, 5г, 6, 8гл, 9б, 11в, 13з приводят к статистически достоверно устойчивому понижению температуры.

Для второй циркуляционной эпохи (1916—1956 гг.) характерно наличие небольшого количества ЭЦМ устойчивого влияния. Статистически достоверным влиянием на повышение температуры воздуха обладают ЭЦМ 2а, 4в, 5г, 8вл, 8гл, 9а, на понижение температуры — ЭЦМ 1а, 5б, 8вл, 9б.

Для третьей циркуляционной эпохи (1957—2013 гг.) характерно наличие ЭЦМ устойчивого влияния в весенне-летний период. К типам ЭЦМ, имеющим статистически достоверное влияние на повышение температуры, относятся ЭЦМ 1а, 2а, 2в, 5в, 5г, 8бз, 8гл. В свою очередь, типы ЭЦМ 1б, 3, 4а, 5г, 8вз, 11а, 12бз, 12бл приводят к статистически достоверно устойчивому понижению температуры.

В дальнейшем анализе подвергалась динамика степени влияния тех типов ЭЦМ, которые продемонстрировали устойчивое по знаку влияние на температуру. Внутригодовая динамика степени влияния устойчиво влияющих типов ЭЦМ отражена в таблицах 4, 5.

Таблица 3

Типы ЭЦМ, характеризующиеся устойчивым и промежуточным влиянием на формирование температурных аномалий (У – устойчивое влияние, П – промежуточное влияние; знаки «+», «<» – знаки температурных аномалий)

знак	Феодосия						Симферополь						
	МС		3		МЮ		МС		3		МЮ		
	У	П	У	П	У	П	У	П	У	П	У	П	
+	1б; 8а; 8гз; 11г; 13з	9б					1б; 8а; 8гз 13з						
-	1а; 10а		12бл				1а; 10а						12бл
<i>Январь</i>													
+	1а		4в				1а		7бз		4в		9а
-	8вз; 13з						4б; 8бз		5г				8бз
<i>Февраль</i>													
<i>Март</i>													
+	1б; 4а				8бл; 8гл	2в	7ал			4а; 11в		8гл; 12вл	2в
-	13з				4в		8вл; 8гл		6	5а; 7бз; 9б; 13з		9б	8вл; 8гл
<i>Апрель</i>													
+	5б	1а; 3; 8бл; 10б	2а		2б; 8гл; 9а; 9б		4а; 5в; 7бз 8бз		5б	1б; 5в		2а; 2б; 9б	5в; 7бз; 8бз
-	4в; 8гл	2а; 8вл; 11б; 12вз			1а; 1б; 4а; 5б; 7аз; 8вз; 8вл	5г	2б; 11а		4в	2а; 6; 8вл; 12вз	8вл	5а; 8вз	2б; 2в 5г

знак	Феодосия						Симферополь					
	МС		3		МЮ		МС		3		МЮ	
	У	П	У	П	У	П	У	П	У	П	У	П
+	2б; 2в; 8бз; 8гл; 12вз		5г	8бз	1а	1б; 8бз	8вз	2б; 8вл; 8гл; 12г		5б; 5г; 7ав; 8бз	1а	1б; 8бз
-	11а; 12бз		1а; 9б	8гз	8вз	8гз; 11г; 12бз; 12вз	11в		9б	1а; 8гз; 11а	8вз; 11а	4а; 12бз; 12вз
+					5в			2б; 8бл		12а	5в	
-					8вл	4а; 12бз		8вл		12г	4а; 12б	
+	13л			12а	5г	7ал		13л			5г	7ал
-	2а; 8вл				1б	4а					1б	4а
+	7бл; 8гл			3; 12вл	8бз	8гз; 12г		7бл; 12а		3; 12вл	8бз	8гз; 12а
-	2а; 8бл; 9б; 12в		5б	1а; 12а	1б	1а; 4а; 7бл 11г		2а; 9б	1а	5б; 12а	1б	1а; 4а; 7бл; 11г
+	2б; 2в; 7ал; 7бз 8бл; 8вл; 9а		8вл	1б; 4в; 5г; 12б		2в; 5в; 7б	9а	2а; 2б; 2в; 7бз; 8бл		2б; 4а; 5г; 8вл; 12бл		2в; 5в; 7бз
-	6; 8вз; 11в; 12вз 13з			2а; 2в; 12г		8гз; 11б		1а; 8вл; 11в; 13з		2в; 11б		7бл; 8гз; 11б

*Май*

*Июнь*

*Июль*

*Август*

*Сентябрь*



		Феодосия						Симферополь					
знак	МС		3		МЮ		МС		3		МЮ		
	У	П	У	П	У	П	У	П	У	П	У	П	
+	1а	3; 6; 7ал; 8бз; 8вл		4в; 8гл; 9а		8вл; 8гл		1а; 6; 7ал		8гл		8вл; 8гл	
-	5в; 9б	8вз		9б; 12вл		2а; 5в		8вз; 12г		9б; 12вл		2б; 5в	
<i>Октябрь</i>													
+		8вз; 8гл; 11г				8вл; 12бл		1б; 11г		9а		8вл; 12бл	
-		4а; 5в; 9б		5в; 9а		2а; 8г		5в				4в	
<i>Ноябрь</i>													
+													
-													
<i>Декабрь</i>													
+		1а; 6		9б		5г; 10б		1а		9б		5г	
-						3; 4в		6; 8а			3	4в	

Таблица 4

**Внутригодовая динамика степени влияния устойчиво влияющих типов ЭЦМ на метеостанции Феодосия (среднемесячное значение отклонения от среднемесячной температуры воздуха, °С)**

Тип ЭЦМ	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Меридиональная северная циркуляционная эпоха</i>												
1а	-3,68	10,19	1,53	3,45					-1,46	1,77	0,13	3,41
1б	3,95	1,69	4,85	0,38						0,91	-1,37	0,54
2а				-2,65		1,02	-1,11	-1,11	3,10			
2в					1,29		-0,14	-1,12	2,10			
4а		0,21	4,07	0,01			0,23	0,76		-0,85	-1,38	0,90
4в				-4,99	-1,60	0,37			-2,35			
5б	2,74	-0,50	0,04	1,30					-0,81	-2,24	-0,29	1,29
5в		-0,55		0,95					1,71	-4,31	-2,56	
5г	-2,08	-6,44		0,74					1,65	2,73	-2,95	1,10
8вЛ				-2,42	3,01	-1,43	-0,50	-2,73	1,76	1,55		
8гЛ				-0,19	2,88	0,14	0,14	0,80		-0,54	3,63	
9б		-0,28	-0,56	1,39				-2,05		-1,43	-1,85	0,10
11в	-2,70	-0,26	2,44		-3,78				-3,47	-0,47	-0,84	-3,78
13з	7,77	-4,96	-4,78						-1,77	3,33	-0,16	-3,27

Тип ЭЦМ	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Зональная циркуляционная эпоха</i>												
1а	-0,81		0,67	-1,85	-2,02		-3,66	-1,62	-0,61	-1,24		0,52
2а	-2,44			2,41	1,30	-0,14	0,32	-2,41				
4в		2,22		-0,49	0,56	0,15	-0,24	3,07	1,63			
5б	1,78	0,30		-2,85	1,63			-0,05	0,11	-0,08		0,81
5г	-0,24	1,21		-1,86	0,29			2,47	0,34	3,19		1,22
8бл				-3,31				4,27	0,17			
9б	2,97	3,32	-1,70	2,23	-3,23	-2,56	0,35	-0,55	-3,29	0,54		2,83
<i>Меридиональная южная циркуляционная эпоха</i>												
1а	-0,15	-0,85	1,02	-0,63	2,50		-1,21	0,74	0,89	0,24		1,21
1б	1,70	-0,96	0,26	-0,03	0,25		-0,90	0,33	1,05	-0,14		0,83
2а	2,38		-0,67	0,22	-0,35	0,35	0,37	-0,55	-2,61	3,16		
2в			8,20	-0,33	-1,80	1,09	0,47	4,57	2,20	2,44		
5в	2,51	-1,10	1,11	1,27		5,57		2,29	-3,48	-2,07		-0,43
5г	0,43	2,46	-1,95	-3,43			2,88	-0,91	-1,31	-1,24		4,16
8бз	-1,66	-1,70	-0,76	2,44	2,76			-0,18	0,16	-0,92		-3,85
8вз	-1,18	-1,36		-0,49	-2,60		0,43	0,23	-0,20	0,77		2,91
8гл			-2,77	1,12	-0,54	-0,60	-0,44	0,69	5,40	1,96		
12бл	-3,68		0,24	0,27	0,22	-0,38	-0,10	0,27	0,15	2,40		

Таблица 5

Внутригодовая динамика степени влияния устойчиво влияющих типов ЭЦМ на метеостанции Симферополь (среднемесячное значение отклонения от среднемесячной температуры воздуха, °С)

Тип ЭЦМ	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Меридиональная северная циркуляционная эпоха</i>												
1а	-3,06	8,98	0,25	2,43					-0,47	2,15	0,21	4,36
4в	2,17	-0,47	0,10	-4,10	-0,79	1,21	0,73	0,69	-1,71	-2,59	0,49	1,66
5б	-2,20	-8,40		1,83					1,09	2,30	-1,40	-0,51
5г									-1,37	6,11	0,42	-3,23
6			-1,05	-5,08	0,81	-0,29	0,27	-1,37		-2,05	7,09	
8вз			0,62		-2,34					-3,64	-0,26	
9а				-0,52	1,72	0,58	-0,81	-0,56	3,90			
11в	-3,74	-0,44	5,56		-4,23				-2,68	-0,91	-2,16	-3,24
<i>Зональная циркуляционная эпоха</i>												
1а	-0,88		1,13	-1,43	-2,22			-4,69	-1,55	-0,97	-0,90	-0,74
4в		3,64	-0,32	-0,84	0,18	-0,06	0,28	0,18	3,21	1,86		
8вд				-2,57				-0,20	4,47	-0,27		
8гд		-1,09	6,87	1,77	0,03		-0,11	-0,36	0,75	0,85		
9а			2,82	2,84	-0,60	0,42	0,58	0,12	0,39	1,09	1,30	
9б	4,65	4,56	-3,13	2,42	-4,07				0,13	-4,55	1,70	3,18

Тип ЭЦМ	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	<i>Меридиональная южная циркуляционная эпоха</i>											
1а	0,02	-0,46	1,51	-0,27	6,43			-1,24	0,77	0,83	0,45	1,01
1б	0,78	-0,70	-0,17	-0,06	1,03		-2,07	-1,16	0,08	0,86	0,05	1,40
2а			-0,88	0,53	-0,41	0,29	0,50	0,67	-0,40	-1,94	0,78	
2в			11,32	-1,18	-2,02	1,31	-0,04	0,56	5,39	4,24	2,57	
3	0,08	-0,96	2,78	0,40	0,32	1,43	0,20	-0,17	0,52	2,64	-1,39	-7,57
4а	-0,76	-0,53	-2,67	0,18	-2,56	-2,12	-1,85	-3,27	-2,42	0,49	-2,32	-1,24
5в	3,49	-0,74	2,49	1,59		5,40			2,59	-4,40	-2,45	-0,63
5г	1,08	2,75	-1,96	-4,51			2,74	-0,04	-1,13	-1,73	-0,71	4,86
8бз	-1,52	-1,91	-2,20	3,16	2,81			1,74	-0,65	0,06	-1,10	-2,96
8вз	-0,43	-1,93	0,72	-0,62	-1,55			0,59	0,20	-0,45	1,37	2,52
8гл			-3,47	0,71	-0,51	-0,38	-0,22	-0,71	2,00	7,48	4,09	
11а	-0,75	-0,08	-0,95	-1,77	-5,22		1,61		-0,51	-0,66	0,11	0,43
12бз	2,36	1,06	-0,22	0,71	-5,20	-2,27		-3,40	-0,21	-0,25	-0,39	0,03

Общей для всех случаев тенденцией является повышение абсолютного значения степени влияния в весенний и осенний периоды. При этом указанные закономерности вполне согласуются с уже приведёнными данными по степени влияния общей циркуляции атмосферы.

Если более детально рассматривать случаи устойчивого влияния ЭЦМ на изменение температуры воздуха и проанализировать, какие синоптические ситуации на тот момент действия каждого конкретного типа ЭЦМ развиваются над территорией Крымского полуострова, можно найти в каждой циркуляционной эпохе некоторые общие тенденции.

Если в **меридиональную северную циркуляционную эпоху** Крымский полуостров оказывается на границе циклонической и антициклонической областей, т. е. во фронтальной зоне, над Крымским полуостровом весной и осенью происходит устойчивое понижение температуры воздуха (ЭЦМ 2в, 13з), а зимой — повышение (ЭЦМ 4а). Если весной Крым оказывается в западном отроге сибирского антициклона (ЭЦМ 1а, 5б, 8вз), происходит устойчивое повышение температуры воздуха за счёт повышенной инсоляции. Выходы южных циклонов на полуостров (ЭЦМ 1б, 2а, 5г, 8вл) также приводят к устойчивому повышению температуры зимой, ранней весной и осенью. Для ЭЦМ 8вл характерно повышение температуры воздуха весной. Приход северо-западных циклонов (ЭЦМ 4в, 6, 9б), напротив, приводит к устойчивому понижению температуры воздуха над исследуемой территорией. Установление области высокого давления над полуостровом приводит к повышению температуры воздуха летом (ЭЦМ 9а) и к понижению её зимой (ЭЦМ 5в, 11в). При арктическом вторжении на Западную Сибирь и распространении на Крым отрога антициклона в тёплое полугодие (ЭЦМ 8гл) температура также понижается.

В **зональную циркуляционную эпоху** пути атлантических циклонов смещаются к северу, а антициклоническая область на континенте расширяется. В связи с этим меняется влияние некоторых

ЭЦМ на температуру в Крыму. Так, из-за более низких температур весной в области сибирского антициклона (Кононова, 1963) при ЭЦМ 1а в его западном отроге, в Крыму, также происходит понижение температуры в весенние месяцы. Антициклоническая циркуляция над полуостровом летом (ЭЦМ 2а, 9а) приводит, как и в первой эпохе, к повышению температуры воздуха. В отличие от первой эпохи, повышение происходит и при ЭЦМ 8гл.

При южных циклонах в Крыму (ЭЦМ 8вл, 9б) весной происходит устойчивое понижение температуры воздуха. Из группы северо-западных циклонов выпал ЭЦМ 4в, при котором Крым оказался под влиянием разросшегося восточного отрога Азорского антициклона. При нём происходит устойчивое повышение температуры весной.

В области фронтальных разделов над Крымским полуостровом (ЭЦМ 5б) осенью происходит устойчивое понижение температуры воздуха.

При ЭЦМ 1а в западном отроге сибирского антициклона в **меридиональной южной циркуляционной эпохе**, как и в первой, происходит повышение температуры воздуха весной. При аналогичной ситуации зимой (ЭЦМ 8вз 11а, 12бз) происходит понижение температуры в силу выхолаживания. Понижение температуры происходит и при арктическом вторжении на ЕТР, достигающем Крыма. (ЭЦМ 4а). В тёплое полугодие формирование стационарного антициклона ведёт к устойчивому повышению температуры (ЭЦМ 2а, 2в).

Выход южных циклонов на территорию Крымского полуострова (ЭЦМ 5г) и прохождение через Крым фронтального раздела (ЭЦМ 12бл) приводит к понижению температуры весной и повышению её зимой (ЭЦМ 5в).

Таким образом, смещение траекторий циклонов и изменение мощности антициклонов от одной эпохи к другой влияет на связь температуры воздуха в Крыму с отдельными ЭЦМ.

## Выводы

1. В пределах каждой циркуляционной эпохи выявлены типы ЭЦМ, характеризующиеся наибольшим значением пропорции циркуляционного вклада в формирование положительных или отрицательных температурных аномалий. Отмечается нелинейный характер влияния ЭЦМ на знак температурной аномалии.

2. Для каждого месяца в рамках каждой циркуляционной эпохи выявлены 3 категории типов ЭЦМ по устойчивости влияния на формирование температурных аномалий:

А) неустойчивое влияние (ошибка среднего достоверно больше среднего);

Б) устойчивое влияние (среднее достоверно больше своей ошибки);

В) промежуточное влияние.

Определена степень влияния наиболее устойчивых типов ЭЦМ для каждой циркуляционной эпохи. Общей для всех случаев тенденцией является повышение абсолютного значения степени влияния в весенний и осенний периоды. Смещение траекторий циклонов и изменение мощности антициклонов от одной эпохи к другой влияет на связь температуры воздуха в Крыму с отдельными ЭЦМ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Крым в рамках научного проекта 14-45-01616 p\_юг\_a.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Боков В. А., Горбунов Р. В. (2011). Климатическая диссимметрия склоновых локальных ландшафтных комплексов Горного Крыма // Учёные записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. «География». Т. 24 (63). № 1. С. 3—14.

Дзердзеевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. (1946). Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Труды научно-исследовательских учреждений ГУГМС СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. — М.: Гидрометгиздат. Вып. 21. 80 с.



*Дзердзеевский Б. Л.* (1956). Проблема колебаний общей циркуляции атмосферы и климата // В сборнике «А. И. Воейков и современные проблемы климатологии» — Л.: Гидрометеиздат. С. 109—122.

*Дзердзеевский Б.Л.* (1968). Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии / Материалы метеорологических исследований. — М.: Наука. 240 с.

Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма (1982). / Под ред. К. Т. Логвинова и М. Б. Барабаш. — Л.: Гидрометеиздат. 318 с.

*Кононова Н. К.* (1963). Изменение температуры и осадков в Восточной Сибири в первой половине XX века (в связи с изменением характера циркуляции атмосферы) // Известия ВГО. Т. 95. Вып. 2. С. 164—168.

*Кононова Н. К.* (2009). Классификация циркуляционных механизмов северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. — М.: Воентехиниздат. 372 с.

*Кононова Н. К.* Колебания циркуляции атмосферы северного полушария в XX – начале XXI века [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://atmospheric-circulation.ru>.

*Кононова Н. К.* (2014). Циркуляция атмосферы в Европейском секторе Северного полушария в XXI веке и колебания температуры в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. Том 10. Выпуск 1. С. 633—639.

*Парубец О. В.* (2009). Анализ климатических рядов Крымского полуострова // Экосистемы Крыма, их оптимизация и охрана. Вып. 1 (20). С. 154—164.

*Парубец О. В., Калиновский П. С.* (2009). Влияние орошения на температуру воздуха (на примере Крымского полуострова) // Экосистемы Крыма, их оптимизация и охрана. Вып. 19. С. 191—195.

*Плохинский Н. А.* (1970). Биометрия. — М.: Изд-во МГУ. 367 с.

*Подгородецкий П. Д.* (1988). Крым: Природа. – Симферополь: Таврия. 192 с.

Система обслуживания гидрометеорологической информацией CliWare. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cliware.meteo.ru/meteo/>.

*Смирнов В. О.* (2009). Роль местоположений в дифференциации тепла и влаги в Горном Крыму: Автореферат диссертации кандидата географических наук. — Симферополь. 22 с.

Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий (2009). / Под ред. Е. А. Позаченюк. — Симферополь: Бизнес–Информ. 672 с.

*Федоров В. М.* (2011). Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. — М.: Физматлит. 376 с.

*Федоров В. М.* (2015). Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // Доклады РАН. Т. 460. № 3. С. 339—342.

*Холопцев А. В., Парубец О. В.* (2014а). Прогнозирование климатических норм среднегодовых температур приземного слоя атмосферы на Южном берегу Крыма с использованием метода множественной регрессии // Исследования в области естественных наук. № 8. Режим доступа к журналу: <http://science.snauka.ru/2014/08/8311>.

*Холопцев А. В., Парубец О. В.* (2014б). Тенденции межгодовой изменчивости климата Горного Крыма и поверхностных температур Средиземного и западной части Черного морей в 1960–2012 гг. зимой // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — М.: Литера. С. 233—238.

## **РАЗНОМАСШТАБНАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ ИНДЕКСОВ ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ АЛТАЙСКОГО РЕГИОНА**

*А. А. Шаранова, И. В. Кужевская*

Томский государственный университет  
Томск, пр. Ленина, 36  
e-mail: al.shar.91@mail.ru

Поступила в редакцию 25.10.2015  
Поступила после доработки 1.02.2016

### **Введение**

Алтайский регион, включающий территории Алтайского края и республики Горный Алтай, представляет собой уникальный природный комплекс с богатым рекреационно-туристическим потенциалом, во многом определяемым природно-климатическими условиями. Климатические ресурсы территории и текущие погодные условия могут лимитировать рекреационное использование, тогда как в настоящее время это одно из наиболее развивающихся направлений экономики региона. Другой ведущей отраслью экономики Алтайского региона является сельское хозяйство, также зависящее от климатических и погодных условий.

Под угрозой, обусловленной изменением климата, принято понимать «прямую или косвенную возможность нанесения ущерба», возникающего в результате климатических изменений (Кокорин, 2011). Негативные последствия климатических изменений часто запускают цепочки ответных реакций в экосистемах и экономике, поэтому эти угрозы делят на первичные и опосредованные.

К числу основных первичных климатических угроз относят долгосрочное повышение температуры (весенние и зимние оттепели, бесснежные зимы, засухи и тепловые волны) и экстремальные

погодные явления (сильные внезапные ливни, снегопады, бури, ураганы и туманы).

Так, в 2015 г. ущерб от весеннего наводнения в Алтайском регионе, вызванного сильными ливнями, составил почти пять миллиардов рублей. В этом же году из-за аномально жаркой погоды, особенно в Онгудайском, Кош-Агачском, Улаганском районах республики Алтай, выгорели почти все однолетние травы, дефицит кормов составил 70 % (Республика Алтай...).

Крайне неблагоприятные условия погоды наблюдались и в 2014 году. Весной и в начале лета от паводка пострадал ряд объектов региона, в том числе малая ГЭС "Кайру" и мост через р. Катунь в Онгудайском районе. Летом от засухи пострадало более 1 млн гектаров посевных площадей, погибло свыше 165 тыс. га сельскохозяйственных культур в 17 районах Алтайского края; на 17 тыс. га посевы были выбиты градом. В сентябре осадки превысили норму на 40—90 %, что существенно снизило темпы уборочных работ на всей территории края. В октябре выпало от 90 до 200 мм осадков (свыше 3—4 месячных норм). Во второй декаде октября (на 10—12 дней раньше среднегодовых сроков) в половине районов края выпал снег, а в третьей декаде снежный покров установился на всей территории региона. По данным главного управления сельского хозяйства Алтайского края под снег ушло порядка 400 тыс. га сельхозкультур.

В 2013 году в Алтайском регионе наблюдалась аномально холодная и дождливая погода в теплый период года, а 2012 год запомнился как один из наиболее засушливых за период метеорологических наблюдений.

В целом проявление тенденции увеличения повторяемости и интенсивности региональных гидрометеорологических аномалий на фоне происходящих глобальных климатических изменений отмечалось в Оценочных докладах об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008, 2014), а также в докладе IPCC Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability (Field, Barros et al., 2014).

Целью данного исследования является оценка циклических изменений экстремальных показателей климата об атмосферных осадках и температуре воздуха на территории Алтайского региона.

### Материалы и методы исследования

Информационной базой для оценки изменчивости метеорологических (по данным наблюдений) и расчетных параметров, характеризующих современные климатические условия на территории Алтайского региона, послужили данные суточного разрешения об атмосферных осадках и температуре воздуха на 13 метеорологических станциях области с 1960 по 2012 гг. (ВНИИГМИ-МЦД).

Для выявления экстремальных климатических явлений в режиме температуры и осадков использованы индексы, разработанные и рекомендованные объединённой рабочей группой ВМО по обнаружению изменения климата — STARDEX Diagnostic Extremes Indices (Statistical..., 1999):

1) ***TN10p*** — число дней в году с минимальными температурами ( $TN_n$ ) ниже 10 % процентиля ежесуточного распределения минимальных температур за базовый период 1961—1990 гг.;

2) ***TX10p*** — число дней в году с максимальными температурами ( $TX_x$ ) ниже 10 % процентиля ежесуточного распределения максимальных температур за 1961—1990 гг.;

3) ***TN90p*** — число дней в году с минимальными температурами ( $TN_n$ ) выше 90 % процентиля ежесуточного распределения минимальных температур за базовый период 1961—1990 гг.;

4) ***TX90p*** — число дней в году с максимальными температурами ( $TX_x$ ) выше 90 % процентиля ежесуточного распределения максимальных температур за базовый период 1961—1990 гг.;

5) ***R95p*** — годовая сумма сильных осадков выше 95 % процентиля распределения суточных осадков за 1961—1990 гг. в общем годовом количестве осадков.

При исследовании циклов метеорологических рядов используют две группы методов. К первой относятся методы визуальных оценок: методы скользящих средних, интегрально-разностных кривых (Исаев, 1988). Методы второй группы более объективны: автокорреляционная функция (Афанасьев, 2001), гармонический анализ и др.

Гармонический анализ является наиболее обычным типом анализа, применяющегося для исследования периодического хода метеорологических параметров (Поляков, 2012; Чередыко, 2012; Statistical..., 1999). Получаемые в результате разложения рядов можно рассматривать как независимый объект и объяснять различные гармониками разными физическими причинами (Афанасьев, 2001; Пановский, 1967). Например, при помощи гармонического анализа флуктуации температуры могут быть представлены в форме, удобной для использования их в качестве граничных условий при решении определенных дифференциальных уравнений (Дубровская, Князев, 2011; Пановский, 1967). В работе М. Г. Серебренникова (1965) применительно к колебаниям механических и электрических систем для определения параметров гармонических компонент предлагается использовать классический метод наименьших квадратов.

В ходе настоящего исследования тренд был аппроксимирован линейной функцией и затем удален из ряда.

Прежде чем приступить к гармоническому анализу, для каждого исследуемого показателя экстремальности был проведен кластерный анализ и получены соответствующие кластеры. На начальном этапе в имеющейся пространственной выборке, состоящей из полей климатических показателей экстремальности по исследуемым станциям, происходит выделение каждой из них в отдельный класс. Такие классы, состоящие из единственного поля, называются начальными. Значения поля можно рассматривать как векторы в евклидовом пространстве. Общее число рассматриваемых векторов равно количеству полей в выборке  $N$ , т. е. количеству рассматриваемых станций (13 станций).

В качестве критерия близости классов был использован метод Уорда (Ward's method), который предполагает, что на первом шаге каждый кластер состоит из одного объекта, и первоначально

объединяются два ближайших кластера. Метод Уорда приводит к образованию кластеров приблизительно равных размеров с минимальной внутриклассовой вариацией. В итоге все объекты оказываются объединенными в один кластер (Поляков и др., 2012).

Изменения климата на различных интервалах времени и в разных регионах ведут к трансформации функций плотности распределения  $f(x)$  метеорологических элементов. Трансформация функций плотности распределения выражается, прежде всего, в сдвиге положения центра распределения гидрометеорологических показателей, а также в изменении (в увеличении или уменьшении) дисперсии, характеризующей межгодовую изменчивость (Грингоф, 2013).

Для анализа текущих изменений метеорологических или иных параметров  $f(x)$  — среднего арифметического ( $E$ ) и дисперсии ( $V$ ) И. Г. Грингоф (2013) предлагает использовать метод EV-диаграмм. На EV-диаграмме расстояние между соседними точками  $V_i$  и  $V_{i+1}$  характеризует степень изменения (трансформации) кривой распределения плотности вероятности за счет добавления нового наблюдения и изъятия самого «старого» наблюдения анализируемого временного ряда. Чем значительнее эти два наблюдения отличаются друг от друга, тем на большее расстояние каждый год смещается точка, характеризующая текущее состояние климата. Если новое и старое наблюдения совпадают, то точка  $V_i$  сохраняет свое положение на диаграмме.

## Результаты исследования

Изменения экстремальных температур являются более сложными и, вероятно, более значимыми для окружающей природной среды и общества по сравнению с изменением средней температуры воздуха (Wigley, 1985). Экстремальные температуры оказывают непосредственное воздействие на биосистему и человека (Jendritzky, 2004), так, например, по оценке Всемирной организации здоровья, смертность, связанная с экстремальными температурами, может быть больше, чем от наводнений или ураганов. От проявления

экстремальности в поле температуры воздуха может зависеть степень комфорта или дискомфорта.

Средние многолетние значения индексов (рис. 1), характеризующих температуру воздуха (*TN10p*, *TX90p*, *TN90p*, *TX90p*) мало изменяются по рассматриваемой территории. Повторяемость холодных и теплых дней/ночей формируется под воздействием идентичных между собой атмосферных процессов. Что касается индекса *R95p*, характеризующего поле осадков, то изменчивость его по территории существенно выше. Высокие значения *R95p* более 150 мм в год отмечаются на станциях среднегорья (Змеиногорск, Солонешное, Кызыл-Озек). Максимальное значение *R95p* получено для станции Яйлю — 220,3 мм в год, минимальное на высокогорной долинной станции Кош-Агач — 37,3 мм в год.



Рис. 1. Распределение средних климатических показателей экстремальности по территории Алтайского региона.



EV-диаграммы были построены на основе 20-летних скользящих средних (рис. 2) для климатических показателей экстремальности по данным наблюдений метеорологических станций Славгород и Кош-Агач (выбор станций обусловлен различием их высоты над уровнем моря). В качестве начальной точки выбран период 1960—1979 гг. Кривая, соединяющая начальную и конечную точку, представляет собой траекторию изменения, соответствующего климатического показателя экстремальности за рассматриваемый период. Изменения произошедшие с 1960 по 2012 гг. по данным метеостанций Славгород и Кош-Агач не имели однонаправленного и равномерного характера.

Для холодных дней и ночей (рис. 2а) на метеостанции Славгород наблюдается уменьшение значения средних и среднего квадратического отклонения. На метеостанции Кош-Агач уменьшается повторяемость холодных ночей и дней, но среднее квадратическое отклонение увеличивается. Оба параметра определяют функцию плотности нормального распределения, поэтому расстояние между двумя соседними точками на EV-диаграмме характеризуют степень изменения кривой распределения плотности вероятности (Грингоф, 2013).

Основная тенденция (рис. 2б) для повторяемости теплых ночей и дней — устойчивое увеличение — проявилась достаточно четко. Сравнение положения начальной и конечной точек указывает на увеличение повторяемости среднего значения и среднеквадратического отклонения. Однако для повторяемости теплых ночей на станции Кош-Агач характерно увеличение скользящего среднего и постоянство среднеквадратического отклонения. Нужно отметить, что повторяемость теплых ночей/дней в году *TN90p* и *TX90p* испытывает незначительные трансформации текущего состояния климата.

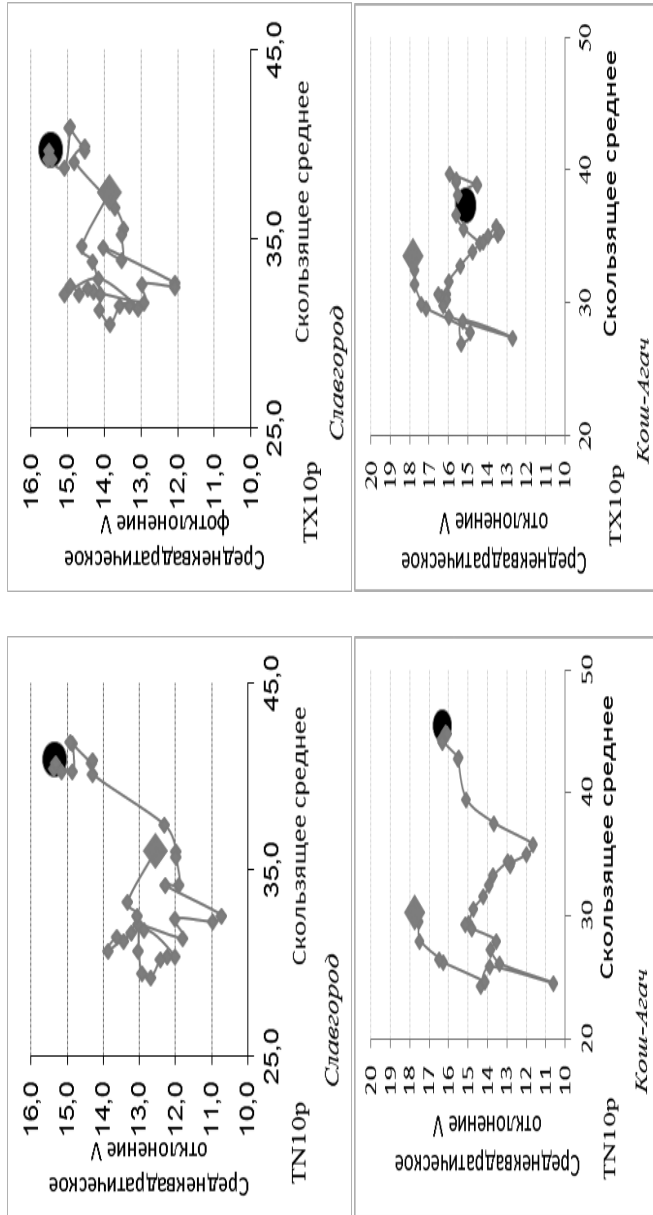


Рис. 2а. EV-диаграмма для повторяемости холодных ночей (TN10p) и дней (TX10p).  
 (● - начальная точка; ◆ - конечная точка).

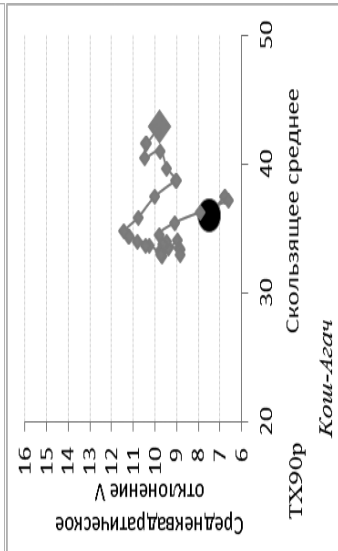
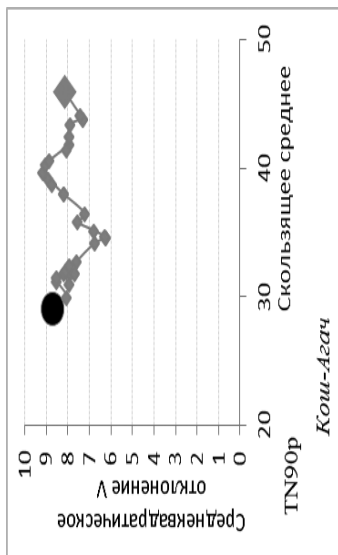
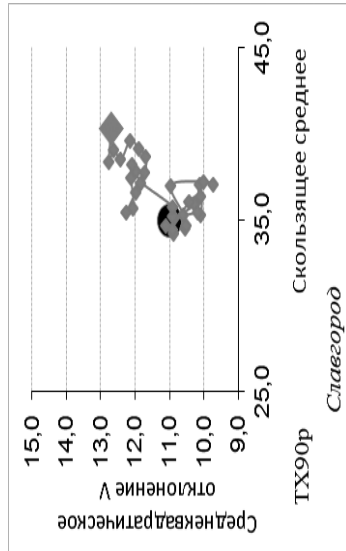
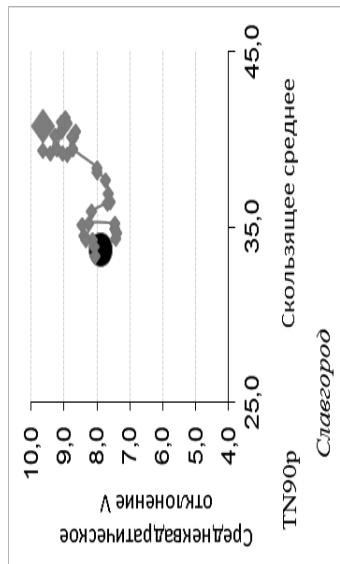


Рис. 26. EV-диаграмма для повторяемости теплых ночей (TN90r) и дней (TX90r).  
 (● - начальная точка; ◆ - конечная точка).

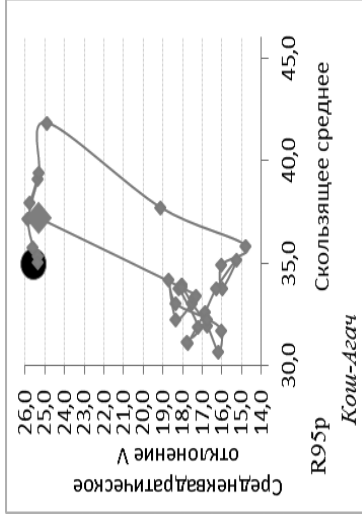
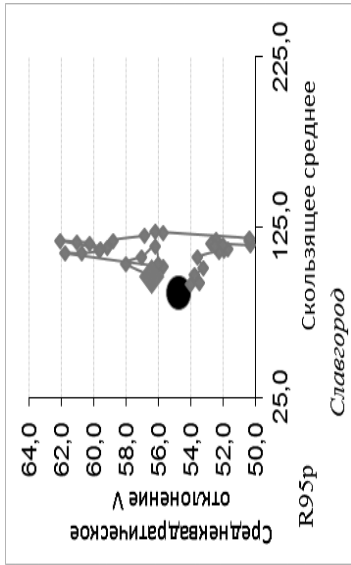


Рис. 2в. EV-диаграмма для суммы сильных осадков (**R95p**) скользящих 20-летних периодов с 1960 по 2012 г.

(● начальная точка; ◆ конечная точка).

Для индекса *R95p* не наблюдается каких либо изменений за рассматриваемый период (рис. 2в). Изменения носят циклический характер, при этом испытывая значительные колебания, отмечаемые в 80-х годах. В целом, сумма сильных осадков незначительно увеличилась (на 2—3 мм).

Для выявления районов в Алтайском регионе, схожих между собой по поведению временных рядов, был проведен кластерный анализ для каждого исследуемого показателя экстремальности. Применение иерархического кластерного анализа для классификации *TN10p* (рис. 3) позволило выделить два класса и четыре обособленные станции (Усть-Кокса, Кара-Тюрек, Змеиногорск, Кош-Агач). В работе Волковой М. А. с соавторами (2012) приводятся результаты кластерного анализа территории Алтайского региона по другим климатическим показателям, которые довольно хорошо согласуются с результатами классификации нашего исследования.

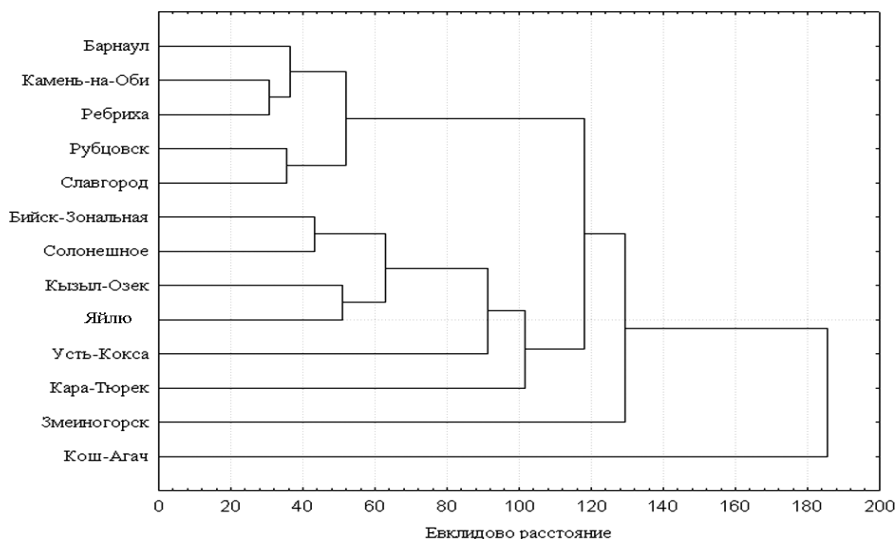


Рис. 3. Дендрограмма иерархического кластерного анализа значений индекса *TN10p* по территории Алтайского региона.

Итоги иерархического анализа позволили определить наиболее вероятное количество классов разделения в математическом пространстве исследуемых индексов, что позволило применить для итоговой классификации метод «*k*-средних», относящийся к итеративным методам эталонного типа (Томашевич и др., 1999).

В табл. 1 представлена классификация рассматриваемых индексов по станциям Алтайского региона с использованием алгоритма классификации «*k*-средних».

Станция, соответствующая центру кластера, определялась с использованием коэффициента корреляции Пирсона, рассчитаного по отношению к полученному среднему каждого класса. В качестве центра кластера выбиралась та станция, степень связности которой со средним классом была максимальной.

Таблица 1

**Классы климатических показателей экстремальности**

<b>Станция</b>	<b><i>TN10p</i></b>	<b><i>TX10p</i></b>	<b><i>TN90p</i></b>	<b><i>TX90p</i></b>	<b><i>R95p</i></b>
Барнаул	1	3	2	1	<b>1</b>
Бийск- Зональная	2	1	<b>1</b>	5	2
Змеиногорск	1	<b>3</b>	1	<b>4</b>	2
Камень-на-Оби	1	1	2	<b>2</b>	1
Кара-Тюрек	3	3	<b>3</b>	3	2
Кош-Агач	<b>3</b>	<b>2</b>	1	1	2
Кызыл-Озек	2	3	1	<b>1</b>	4
Ребриха	1	1	<b>2</b>	2	1
Рубцовск	1	1	2	4	1
Славгород	<b>1</b>	<b>1</b>	2	2	1
Солонешное	2	1	1	4	<b>2</b>
Усть-Кокса	2	2	2	<b>3</b>	1
Яйлю	<b>2</b>	3	1	1	0

Примечание: 1 – центральная станция кластера; 0 – станция, которая не принадлежит кластеру.

После выделения центра классов был проведен гармонический анализ каждой центральной станции для каждого из рассматриваемых индексов (табл. 2). Набор ведущих гармоник схож на всех станциях для каждого кластера. Различия проявляются в степени влияния той или иной периодичности на амплитуду колебаний. Гармоника с одной периодичностью имеет разный порядковый номер. В интерпретации используемого метода заложена связь между порядковым номером гармоник и степенью ее влияния на амплитуду колебания.

Таблица 2

**Гармоники климатических показателей экстремальности  
центральных станций класса**

Станции	<i>TX10p</i>			<i>TX90p</i>				<i>TN10p</i>			<i>TN90p</i>			<i>R95p</i>	
	Славгород	Кош-Агач	Змеиногоorsk	Кызыл-Озек	Камень-на-Оби	Усть-Кокса	Змеиногоorsk	Славгород	Яйло	Кош-Агач	Бийск	Ребриха	Кара-Тюрек	Барнаул	Солонешное
	14	14	4	19	10	10	10	14	14	14	8	8	8	10	10
Гармоники	4	4	3	11	4	4	5	9	5	9	31	31	29	20	20
	3	3	14	5	19	18	21	5	9	46	3	3	3	13	14
	45	9	9	37	5	5	4	20	4	5	6	6	6	7	7
	9	20	5	4	7	7	13	4	27	20	17	17	16	6	6
	5	5	25	13	36	8	7	11	2	4	4	4	4	5	5
	20	51	2	8	14	12	3	53	6	11	10	10	5	3	4
	2	2	7	3	8	3	8	2	11	2	5	5	10	9	3
	12	7	8	7	3	9	6	3	3	3	2	2	2	4	2
	7	11	16	10	9	37	41	6	7	6	7	7	12	2	8
	D	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>

Примечание: D — суммарная доля дисперсии ряда, которую можно описать с помощью выделенных гармоник.

Для группы станций индекса *TX10p* характерны 3-, 4-,14-летние гармоник, которые вносят наибольший вклад в суммарную долю

дисперсии ряда (D). Значения  $D \sim 0,81$  свидетельствуют о высокой степени аппроксимации имеющихся флуктуаций с помощью первых значимых 10 гармоник.

Большинство исследователей относят 3-, 4-летние гармоники к внутренним факторам формирования климата (Бухарицин, 2005, Витинский, 1976, Эйгенсон, 1957). Они характеризуют цикл смены направлений зональных ветров в экваториальной нижней стратосфере. Гармонику с периодом в 14 лет многие авторы относят к группе, связанной со средним периодом одного оборота Солнца вокруг центра масс Солнечной системы и периодичностью изменения числа солнечных пятен.

Наибольшее единообразие по степени вклада и синхронности отмечается для центров классов в поле индекса *TN90p*. Выделяются короткие циклы, относящиеся к внутренним факторам. Присутствует 29 (31)-летняя гармоника, которая, по мнению многих авторов, связана с циклом Брикнера-Шнитникова (Эйгенсон, 1957). Этот цикл проявляется в динамике характеристик климата и крупномасштабной циркуляции атмосферы. Все значения D составляют 0,7, таким образом, в большей степени дисперсия ряда описывается гармониками «внутренних факторов».

Аналогичные проявления гармонической составляющей ряда характерны и для индекса *TN10p*. Однако на станции Кош-Агач проявилась 46-летняя гармоника, которая не выявлена в рядах природно-климатических характеристик по литературным источникам. Существенное влияние на D принадлежит гармоникам, которые являются откликом внешних факторов.

В группе станций индекса *TX90p* наблюдается единообразие в наборе гармоник. Однако на станции Кызыл-Озек значимость гармоник по степени вклада и синхронности отличается. Ведущая роль принадлежит гармоникам, относящимся к внешним факторам. Следовательно, можно говорить о том, что в районах высокогорных станций имеются свои особенности в поведении высоких и низких температур. Остальным станциям соответствуют 4-, 5-, 10-летние гармоники. С циклом Эль-Ниньо связывают 5-летнюю гармонику (Эйгенсон, 1957), цикл в 10 лет связан с солнечной активностью.



Добавляются гармоники с периодичностью 18-, 19-лет, которые соответствуют периоду нутации земной оси, проявляются в динамике климата, сейсмичной и вулканической активности (Витинский, 1976, 1983, Эйгенсон.1957). Гармоника с периодом 21 год соответствует циклу Хейла (Витинский, 1976, 1983). При этом суммарная доля дисперсии составляет 0,65—0,66.

Для индекса ***R95p*** значения суммарной описанной дисперсии — 0,57. Наибольший вклад в ее описание вносят гармоники, связанные с внешними факторами (солнечная активность, цикл Хейла). Наименьший вклад принадлежит коротким гармоникам внутренних факторов.

В качестве примера для центральной станции выделенного класса представлен график временного хода индекса ***TN90p*** и его основных гармоник (рис. 4). Так как именно повторяемость самых теплых ночей в году увеличивается практически повсеместно.



Рис. 4. Ход индекса ***TN90p*** и его основных гармоник для станции Бийск-Зональная (центральная станция выделенного класса):  
 восстановленный — сумма тренда и десяти гармоник;  
 g31 — 31-летняя гармоника; g10 — 10-летняя гармоника;  
 g8 — 8-летняя гармоника

Гармоники, представленные на рис. 4, хорошо описывают колебания индекса *TN90p*. Так, 8-летняя гармоника достаточно хорошо описывает повторяемость дней с аномально высокой температурой. Предполагается, что 8-летний цикл обусловлен гравитационным влиянием планет (Эйгенсон, 1957, Витинский, 1976). Гармоники с периодом 10 – 11 лет были проверены на совпадение фаз с фазами Солнечного цикла. В результате сопоставления с числами Вольфа были обнаружены аналогичные циклические изменения, схожие по фазе наступления максимума и минимума. Однако в изменении температуры четкой зависимости от года солнечного цикла не обнаружено. Это связано с тем, что в рядах температуры на станциях Алтайского региона влияние 10-11-летней гармоник не так существенно. Свой вклад вносит 31-летняя гармоника, которая хорошо описывает общее колебание временного ряда.

### Заключение

Расчет показателей экстремальности, выполненный для 13 метеорологических станций Алтайского региона за период за 1960—2012 гг. по данным суточного разрешения об атмосферных осадках и температуре воздуха, показал, что:

— среднее число холодных/теплых дней/ночей (экстремально низких или высоких температур воздуха) составляет 36—37 дней и мало изменяется по территории исследования;

— средняя годовая сумма сильных осадков существенно различается в зависимости от места наблюдения (Яйлю 220,3 и Кош-Агач 37,3 мм).

В период 1960—2012 гг. для всей рассматриваемой территории характерно уменьшение числа экстремально холодных и увеличение числа экстремально теплых дней/ночей. Наиболее значимые изменения отмечаются в поле сильных осадков (индекс *R95p*) и числе холодных ночей (индекс *TN10p*). Изменение годовых сумм сильных осадков носит циклический характер, причем они наиболее заметные изменения происходили в период 1980—1990 гг.

При объективной классификации методом «*k*-средних» значения индексов объединяются в устойчивые компактные и территориально хорошо локализованные группы.

Для каждого показателя экстремальности характерна 3-, 4-летняя гармоника. Также присутствует цикл 10—11 лет, который совпадает по фазам наступления максимумов и минимумов с солнечным циклом и оказывает влияние на каждый из рассмотренных параметров экстремальности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Алтайский край*: официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL доступа: <http://www.altairegion22.ru> (дата обращения 29.11.2015.)

*Андреева Л. Н.* (2008). Эволюция природной среды и климата Арктики в квартале // Вестник ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. № 4 (160). С. 2—6.

*Анисимов О. А., Израэль Ю. А.* (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет. 288 с.

*Афанасьев В. Н.* (2001). Анализ временных рядов и прогнозирование. — М.: Изд-во «Финансы и статистика». 228 с.

*Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В., Чередыко Н. Н.* (2013). Метеорологические условия высокогорной части Республики Алтай: современные характеристики, оценки изменчивости, влияние на режим ледников // Лёд и снег. № 4(124). С. 23—29.

*Бардин М. Ю., Платова Т. В.* (2011). Изменение порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том 25. — М.: ИГКЭ. С. 71—93.

*Букреева Г. Ф.* (1995). Климат Западной Сибири: в прошлом и будущем // Геология и геофизика. Т. 36. № 11. С. 3—22.

*Бухарицин П. И., Андреев А. Н.* (2006). Ритмы солнечной активности и ожидаемые экстремальные климатические события в Северо-Каспийском регионе на период 2007—2017 // В сб. Труды международной науч. конференции. «Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе», Москва, 19—20 октября 2005 г. — М. С. 137—143.

*Витинский Ю. И., Оль А. И., Сазонов Б. И.* (1976). Солнце и атмосфера Земли. — Л.: Гидрометеониздат. 350 с.

- Витинский Ю. И.* (1983). Солнечная активность. — М.: Наука. 192 с.
- Волкова М. А., Кусков А. И., Чередыко Н. Н.* (2012). Температурные риски и оценка вероятности их возникновения на территории Алтайского края и республики Алтай // Вестник Томского государственного университета. № 355. С. 148—153.
- Второй оценочный доклад* Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014). — М.: Росгидромет. 1004 с.
- Грингоф И. Г.* (2013). Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том III. Часть 1. Основы агроклиматологии. Часть 2. Влияние изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство // Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 384 с.
- Дубровская Л. И., Князев Г. Б.* (2011). Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: Учебное пособие. — Томск: ТМЛ-Пресс. 120 с.
- Исаев А. А.* (1988). Статистика в метеорологии и климатологии. — М.: Изд-во МГУ. 248 с.
- Кокорин А. О.* (2011). Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад. — М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России). 168 с.
- Пановский Г. А.* (1967). Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат. 241 с.
- Поляков Д. В., Кужевская И. В.* (2012). Применение кластерного анализа для оценки температурно-влажностных условий в период активной вегетации на территории юга Западной Сибири и его связь с гидротермическим коэффициентом Т. Г. Селянинова// Вестник Томского государственного университета. № 360. С. 188—192.
- Республика Алтай: официальный интернет* — портал. [Электронный ресурс]. URL доступа: <http://www.altai-republic.com> (дата обращения 30.11.2015).
- Российский гидрометеорологический портал ВНИИГМИ-МЦД.* [Электронный ресурс]. URL доступа: <http://www.meteo.ru> (дата обращения 15.10.2014).
- Серебренников М. Г.* (1965). Выявление скрытых периодичностей. — М.: Наука. 244 с.
- Оценочный доклад* об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008). Том 2. Последствия изменений климата. — М.: Росгидромет. 288 с.
- Томашевич В. Н., Сошникова Л. А., Уебе Г., Шефер М.* (1999). Многомерный статистический анализ в экономике: Учеб. Пособие для вузов. — М.: ЮНИТИ-ДАНА. 598 с.

*Черedyko H. H.* (2012). Оценка пространственно-временной структуры климатической компоненты и метеорологических рисков геосистемы Алтайского региона // дис. ... канд. геогр. наук. Томск. – 194 с.

*Черedyko H. H., Журавлев Г. Г., Кусков А. И.* (2014). Оценка современных климатических тенденций и синхронности их проявления в Алтайском регионе // Вестник Томского государственного университета. № 379. С. 200—208.

*Эйгенсон М. С.* (1957). Очерки физико-географических проявлений солнечной активности. — Львов: Издательство Львовского университета. 231 с.

*Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects.* — Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University press. 1322 pp.

*Jendritzky G.* (2004). Heat-waves: risks and responses. // Health and Global Environmental Change. Vol. 2. P. 124.

*Framework Programme: Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions (STARDEX).* (1999). URL доступа: <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/> (дата обращения: 15.11.2014).

*Wigley T. M.* (1985). Impact of extreme events // Nature. Vol. 316. P. 106—107.

УДК 551.583

**Оценка возможного влияния изменений климата на агроклиматические условия произрастания хлопчатника и яровой пшеницы в Средней Азии.** Школьник И. М., Пигольцина Г. Б., Ефимов С. В. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 7–32.

Представлены результаты количественной оценки изменений агроклиматических условий произрастания различных сортов хлопчатника и яровой пшеницы к середине XXI века на территории Средней Азии, полученные на основе прогноза будущего климата по региональной климатической модели ГГО и сценария RCP8.5 МГЭИК.

*Ключевые слова:* глобальные и региональные изменения климата, региональная модель, аридная территория, агроклиматические показатели, хлопчатник, яровая пшеница.

Табл. 1. Ил. 10. Библ. 18.

УДК 551.510

**Модель распространения атмосферных примесей типа «источник—рецептор» для оценки по климатическим данным антропогенной нагрузки на окружающую среду в мезо- и региональном масштабе.** Генихович Е. Л., Грачева И. Г., Румянцев Д. Ю., Яковлева Е. А. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 33–53.

Статья посвящена описанию модели типа «источник—рецептор», предназначенной для оценки выпадения загрязняющих веществ на подстилающую поверхность и построенной на физически обоснованных параметризациях процессов выведения из атмосферы этих веществ за счет их сухого, гравитационного и влажного осаждения. В качестве входной информации в модели используются данные об источниках выбросов, а также стандартные характеристики режима изменения определяющих метеорологических параметров, которые получаются при климатологической обработке рядов метеонаблюдений. В качестве примера представлены результаты расчетов выпадения примесей на поверхность Ладожского озера, а также результаты верификации модели с использованием материалов наблюдений за химическим составом атмосферных осадков на ст. Воейково. Обсуждаются методические вопросы применения разработанной модели совместно с региональной климатической моделью для оценки изменения нагрузки на окружающую среду в связи с возможными изменениями климата.

*Ключевые слова:* Модель типа «источник—рецептор», атмосферные примеси, антропогенная нагрузка, региональная климатическая модель.

Ил. 1. Библ. 18.

УДК 551.510.42

**Разработка мезомасштабной/региональной химической транспортной модели ГГО (ХТМ\_ГГО).** Генихович Е. Л., Грачева И. Г., Зив А. Д., Румянцев Д. Ю. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 54–81.

Описана структура региональной химической транспортной модели ХТМ\_ГГО. В модели для аппроксимации адвекции используется схема М. А. Гальперина. Аппроксимация турбулентной диффузии, влажного осаждения и конвективного переноса осуществляется на основе методологии, разработанной в ГГО. Процессы физико-химической трансформации описываются с помощью механизма CBM IV. В качестве метеорологического драйвера при моделировании используется модель численного прогноза погоды WRF. Для валидации ХТМ\_ГГО результаты расчетов сопоставлены с известными в простых частных случаях аналитическими решениями уравнения атмосферной диффузии, а затем проведено сравнение с данными региональных трассерных экспериментов CARTEX. В качестве примера практического применения приведены некоторые результаты расчетов загрязнения воздушного бассейна Санкт-Петербурга. Методология сравнения данных расчетов и измерений в городах, а также численного прогноза загрязнения воздуха в городах будет изложена в отдельной публикации.

*Ключевые слова:* химическая транспортная модель, валидация, трассерные эксперименты.

Ил. 5. Библ. 51.



УДК 551.509.61

**Теоретические исследования динамики аэрозольных частиц под действием неоднородного электрического поля и оценка ее влияния на процессы рассеивания тумана.** Васильева М. А., Жохова Н. В., Палей А. А., Писанко Ю. В., Солодина А. Е., Толпыгин Л. И., Филипченко К. М. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 82–98.

Рассмотрены способы искусственного рассеивания тумана. Как наиболее эффективный для рассеивания теплых туманов предложен метод электрического воздействия. Разработана математическая модель динамики капель тумана в неоднородном электрическом поле. Результаты моделирования, подтвержденные экспериментами по рассеянию тумана в лабораторной камере, дают основу для совершенствования технологии сверхтонкой очистки газовых потоков от аэрозольных частиц с помощью неоднородного электрического поля.

*Ключевые слова:* рассеивание тумана, аэрозоль, электрическое воздействие, математическая модель, эксперимент.

Ил. 3. Библ. 13.

## УДК 551.501.71

**Оценка уровня концентрации аэрозольных частиц у автомобильной дороги и ЛЭП в сравнении с фоновыми показателями субмикронных частиц естественной атмосферы.**

Васильева М. А., Дубцов С. Н., Жохова Н. В., Палей А. А., Писанко Ю. В., Толпыгин Л. И. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 99–109.

Рассмотрены проблемы загрязнения атмосферы аэрозольными частицами субмикронного диапазона. Основным источником такого загрязнения являются автомобильные дороги. Ионизация воздуха приводит к изменению электрических параметров атмосферы и повышению концентрации субмикронных аэрозолей, что подтверждено результатами исследований вблизи ЛЭП.

*Ключевые слова:* наблюдения, аэрозоль, загрязнение, субмикронные частицы, концентрация, электрическое поле.

Ил. 10. Библ. 8.

**УДК 551.521.9, 551.506.3**

**Оценка естественной освещенности земной поверхности по актинометрическим данным.** Стадник В. В., Шанина И. Н. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 110–124.

Рассматриваются результаты расчета суммарной освещенности различными способами. Анализируется зависимость суммарной освещенности от альbedo подстилающей поверхности для выборок «снег» и «трава». Показано, что определяющими факторами величины освещенности являются высота солнца, количество и форма облаков.

*Ключевые слова:* естественная освещенность, световой эквивалент, альbedo, подстилающая поверхность.

Табл. 5. Ил. 7. Библ. 6.

УДК 551.509.314: (551.507:629.73)

**О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации.**  
Михайловский Ю. П. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 125–137.

Представлены некоторые установленные закономерности развития электризации конвективных облаков на догрозовой стадии, полученные при самолетных исследованиях. Исследовались: состояние облака в момент начала электризации, изменение знака напряженности электрического поля над облаком ( $E$ ) при его развитии, связи  $E$  с контролируемыми параметрами облака в естественном цикле и при воздействиях льдообразующим реагентом. Предлагается методика использования полученных закономерностей для верификации численных моделей.

*Ключевые слова:* верификация численных моделей, конвективные облака, самолет-лаборатория, напряженность электрического поля, радиолокационная отражаемость, воздействия льдообразующим реагентом.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 17.

УДК 551.501.7

**СВЧ радиометрический комплекс дистанционного зондирования интегральных характеристик влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.** Дроздов Д. В., Рыбаков Ю. В., Герасимов О. А. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 138–152.

Приведено описание технического решения построения СВЧ-радиометрического комплекса, предназначенного для наблюдения интегральных влажностных характеристик: влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Разработанный комплекс за время выпуска первой серии приборов подвергся некоторым конструктивным доработкам. В результате последней модернизации комплекса достигнута возможность работы в расширенном температурном диапазоне. Работа комплекса полностью автоматизирована, включая управление системой контроля работоспособности. Для сбора, обработки, передачи данных наблюдений разработан пакет компьютерных программ. Таким образом, результаты наблюдения влажностных характеристик атмосферы собираются полностью в автоматическом режиме, а также передаются непрерывно по сетям связи (Интернет и т. п.).

*Ключевые слова:* СВЧ радиометр, дистанционное зондирование, интегральный водозапас атмосферы, интегральный водозапас облаков, наблюдательные сети.

Ил. 10. Библ. 8.

**Исследование влияния дискретности измерений на значения статистических характеристик временных рядов метеорологических величин.** Ефременко Д. С., Сероухова О. С. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 153–164.

В статье исследуется влияние дискретности измерения температуры и влажности воздуха и атмосферного давления на значения таких статистических характеристик временных рядов как среднее значение, среднее квадратическое отклонение, асимметрия и эксцесс, вид эмпирической функции распределения. При проведении расчетов использовались полученные с помощью автоматической метеорологической станции относительно короткие временные ряды длительностью 1 – 14 суток с дискретностью измерений от 10 с до 180 мин.

*Ключевые слова:* временные ряды метеорологических величин, статистические характеристики временных рядов метеорологических величин.

Табл. 5. Ил. 3. Библ. 5.

## УДК 551.509

**Оценка ресурсов влаги, доступных при активных воздействиях на конвективные облака с использованием гигроскопического реагента.** Русин И. Н., Довгалюк Ю. А., Казанин А. Л. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 165–174.

В статье представлена предложенная авторами методика оценки облачных ресурсов для активных воздействий (АВ) гигроскопическим реагентом с целью получения дополнительных осадков. Помимо использования наземных метеорологических данных об облаках и осадках для оценки ресурсов влаги, доступных при АВ на конвективные облака, была привлечена численная полуторамерная модель конвективного облака и климатические данные об осадках. На примере двух регионов России (Ленинградской (влажный) и Ростовской (сухой) областей) за теплый период 2006—2010 гг. показано, что в выбранных регионах имеются реальные возможности получения дополнительных осадков посредством АВ гигроскопическим реагентом.

*Ключевые слова:* конвективные облака, гигроскопический реагент, ресурсы влаги, эффект воздействия.

Табл. 3. Ил. 3. Библ. 15.

УДК 551.583(477.75)

**Роль циркуляции атмосферы в изменении температуры воздуха на территории Крымского полуострова в XX—начале XXI века.**

Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Калиновский П. С., Кононова Н. К., МIRONЮК О. А. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 175–198.

По данным метеорологических станций Крымского полуострова и материалам типизации циркуляции атмосферы Северного полушария проанализирована связь положительных и отрицательных аномалий температуры воздуха с элементарными циркуляционными механизмами (ЭЦМ) по Б. Л. Дзердзеевскому. Анализ проведен по циркуляционным эпохам. Для каждой циркуляционной эпохи выявлены типы ЭЦМ, характеризующиеся устойчивым формированием положительных или отрицательных температурных аномалий.

*Ключевые слова:* циркуляция атмосферы, элементарный циркуляционный механизм, циркуляционная эпоха, температура воздуха, Крымский полуостров

Табл. 5. Ил. 4. Библ. 20.



УДК 551.582

**Разномасштабная цикличность индексов экстремальности климата на территории Алтайского региона.** Шарапова А. А., Кужевская И. В. Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 199–217.

Для оценки циклических изменений экстремальных показателей климата, проведен анализ пространственно-временной изменчивости экстремальности суточного разрешения атмосферных осадков и температуры воздуха, с применением климатических индексов экстремальности. По результатам спектрального анализа, был получен набор ведущих гармоник для каждого показателя экстремальности. Различия проявляются в степени влияния той или иной периодичности на амплитуду колебаний температуры воздуха и атмосферных осадков.

*Ключевые слова:* показатели экстремальности, цикличность, Алтайский регион, гармоники.

Табл. 2. Ил. 4. Библ. 30.

**Evaluation of possible implications of climate change for agroclimatic conditions of cotton and spring-wheat vegetation.** Shkolnik I. M., Pigoltsina G. B., Efimov S. V. Proceedings of MGO. 2016. V. 580. P. 7–32.

Presented are the results of quantitative estimates of the changes in cotton and spring-wheat agroclimatic vegetation conditions by the mid XXI century in the Central Asia based on future regional climate projection using the MGO RCM and IPCC RCP8.5 scenario.

*Keywords:* global and regional climate change, regional climate model, arid region, agroclimatic indicators, cotton, spring-wheat

Tab. 1. Fig. 10. Ref. 18.

**A source—receptor meso- to regional scale model for estimation of the anthropogenic environmental loading using climatic information.** Genikhovich E., Gracheva I., Rumyantsev D., Yakovleva E. Proceedings of MGO. 2016. V. 580. P. 33–53.

A source-receptor model for estimation of the deposition of atmospheric pollutants on the underlying surface. The model is constructed using parameterizations of dry, gravitational and wet deposition based on physical considerations. Input information includes emission data as well as standard characteristics of the regime of the governing meteorological parameters determined as a result of climatological data processing. As an example, the results of estimation of the deposition of pollutants on the surface of the Ladoga Lake are presented in the paper. The model is verified using data of observations of the chemical composition of atmospheric precipitations at the monitoring station Voeikovo. A methodology of application of the developed model together with a regional climatic model for estimation of the changes in the environmental loadings due to possible climate changes is discussed in this paper too.

*Keywords:* source—receptor model, atmospheric pollutants, anthropogenic environmental loading, regional climatic model.

Fig. 1. Ref. 18.

**Development at MGO of a meso- to regional scale chemical transport model CTM\_MGO.** Genikhovich E., Gracheva I., Ziv A., Rumyantsev D. Proceedings of MGO. 2016. V. 580. P. 54–81.

A structure of the regional transport model, CTM\_MGO, is described in this paper. An approximation of the advections in the model is based on the M. Galperin's scheme, and turbulent diffusion, wet deposition, and convective transport are approximated using MGO techniques. The CBM IV model is used for description of physical and chemical transformation processes. The regional numerical weather prediction model WRF is a meteorological driver in use. The model is validated upon known in simplest cases analytical solutions of the advection-diffusion equation, and then the results of computations are compared with data of the regional tracer experiment CAPTEX. A possibility of the practical applications of the model is illustrated using results of calculations of the air pollution for the city of St. Petersburg. A methodology of comparison of estimated concentrations of urban pollutants with measured ones as well as numerical forecasting of the urban air pollution will be published separately.

*Keywords:* chemical transport model, validation, tracer experiment.

Fig. 5. Ref. 51.

**Theoretical studies of the dynamics of aerosol particles under the influence of an uniform electric field, and assessment of its impact on the processes of the fog dissipation.** Vasilyeva M. A., Zhokhova N. V., Paley A. A. Pisanko Yu. V., Solodina A. E., Tolpygin L. I., Filipchenko K. M. Proceedings of MGO. 2016. Vol. 580. P. 82–98.

Methods of fog modification/dissipation are reviewed. The method of electrical modification has been found to be the most effective for dissipation of warm fog. A numerical model of the fog droplet dynamics in a nonuniform electric field has been developed. The simulation results, supported by experiments with the fog dissipation in a laboratory chamber, provide a basis for improving the technology of superfine gas flow cleaning from the aerosol particles by means of an inhomogeneous electric field

*Keywords:* dissipation of fog, aerosol, electrical modification, numerical model, experiment.

Fig. 3. Ref. 13.

**Assessing the level of concentration of particulate matter from road and power lines in comparison with background rates of submicron particles of natural atmosphere.** Vasilieva M. A., Dubtsov S. N., Zhokhova N. V., Paley A. A., Pisanko Yu. V., Tolpygin L. I. Proceeding of MGO. 2016. V. 580. P. 99–109.

The problems of submicron range aerosol particles air pollution are considered. The main source of this pollution are the automobile roads. Ionization of air leads to a change in the electrical parameters of the atmosphere and increase the concentration of submicron aerosol, which is confirmed by the results of research close to power lines.

*Keywords:* monitoring, aerosol pollution, submicron particles, concentration, electric field.

Fig. 10. Ref. 8.

**Estimation of the natural illumination of the Earth's surface using actinometric data.** Stadnik V. V., Shanina I. N. Proceedings of MGO. 2016. Vol. 580. P. 110–124.

The results of the calculation of the total illumination received by the different ways are considered. The dependence of the total illumination on the surface albedo for samples "snow" and "grass" is analyzed. It is shown that the determining factors on the value of illumination are the sun elevation, the amount and shape of the clouds.

*Keywords:* natural light, light equivalent, albedo, underlying surface.

Tab. 5. Fig. 7. Ref. 6.

**About verification of numerical models of convective clouds based on results of plane researches of electrization.** Mikhaylovsky Yu. P. Proceeding of MGO. 2016. V. 580. P. 125–137.

Some determined features of electrization development of convective clouds at a pre-thunderstorm stage obtained by aircraft research are presented. Condition of a cloud at the beginning of electrization, change of a sign of electric field strength over a cloud ( $E$ ) during its development, dependence of  $E$  from controlled parameters of a cloud in a natural cycle and after seeding are investigated. A method to use of obtained regularities for verification of numerical models is proposed.

*Keywords:* verification of numerical models, convective clouds, aircraft laboratory, electric field strength, radar reflectivity, seeding.

Fig. 3. Tab. 1. Ref. 17.



**Microwave radiometric complex for total atmospheric water vapour and cloud liquid remote sounding.** Drozdov D. V., Rybakov Yu. V., Gerasimov O. A. Proceeding of MGO. 2015. V. 580. P. 138–152.

Microwave radiometric complex designed for integral atmosphere humid parameters observation technical description is presented. Based on first devices production experience some enhancements were made. Widened operating temperature range was achieved as a result of latest modernization. Complex, as well as its built-in control system, is fully automated. To collect, transmit and process observation data special software package was developed. To conclude, data on integral atmosphere humid parameters is fully automatically collected and continuously sent over communications networks (Internet and such).

*Keywords:* microwave radiometer, remote sounding, total water vapour, total liquid water, observation networks.

Fig. 10. Ref. 8.

**Study of the influence on the value discontinuous measurements statistical characteristics of time series meteorological variables.**  
Efremenko D. S, Serouhova O. S. Proceeding of MGO. 2016. V. 580. P. 153–164.

The article investigates the impact of discontinuous measurements of temperature and humidity, and atmospheric pressure on the value of the statistical characteristics of time series as the mean, standard deviation, skewness and kurtosis, view the empirical distribution function. In the calculations used obtained by automatic weather station relatively short time series duration of 1 - 14 days with a readability of measurements from 10 to 180 minutes.

*Keywords:* time series of meteorological variables, the statistical characteristics of time series of meteorological variables.

Tab. 5. Fig. 3. Ref. 5.

**Evaluation of Water Resources Available for Active Modifications of Convective Clouds by Means of Hygroscopical Reagent.** Rusin I. N., Dovgaluk Yu. A., Kazanin A. L. Proceedings of MGO. 2016. V. 580. P. 165–174.

There is presented corrected methodic of cloud resources for estimation of active modification of clouds by hygroscopic reagent to obtain additional precipitations. In addition to using precipitation ground-based data there was used numerical one-and-half-dimensional convective cloud model. There was shown on examples of two regions of Russia (Leningradskaya oblast — humid climate, Rostovskaya oblast — dry climate) for warm seasons of 2006—2010 that there is possibility of obtaining additional precipitations in selected regions by using the hygroscopic reagent.

*Keywords:* convective clouds, hygroscopic reagent, humid resources, active modification effect.

Tab. 3. Fig. 3. Ref. 15.

**Role of atmospheric circulation in air temperature changes on the Crimean peninsula in the XX century — beginning of XXI century.**

Gorbunov R. V., Gorbunova T. Y., Kalinovskii P. S., Kononova N. K., Mironyuk O. A. Proceeding of MGO. 2016. V. 580. P. 175–198.

The relationship of positive and negative air temperature anomalies with elementary circulation mechanisms (ECM) to B. L. Dzerdzeevskii according to the meteorological stations of the Crimean peninsula and materials of typification of the atmospheric circulation in the Northern Hemisphere is analyzed in the paper. The analysis was performed by circulation epochs. We identified types of ECM that are characterized by stable positive or negative temperature anomalies for each circulation epochs.

*Keywords:* circulation of atmosphere, elementary circulation mechanism, circulation epochs, air temperature, Crimean peninsula.

Tab. 5. Fig. 4. Ref. 20.

**Multi-scale recurrence of indexes of extremeness of climate in the territory of the Altai region.** Sharapova A. A., Kuzhevskaya I. V. Proceeding of MGO. 2016. V. 580. P. 199–217.

The analysis of the spatial and temporal variability of daily extreme resolution precipitation and air temperature has been made. The estimation of the cyclic change in extreme has been used. A set of leading harmonics for each extreme indicis has been received according to the results of spectral analysis. The differences are revealed in the degree of the effect of the influence of the frequency of the amplitude of the fluctuatiōs in air temperature and precipitation.

*Keywords:* extremeness indicators, recurrence, Altai region, harmonicas.

Tab. 2. Fig. 4. Ref. 30.

Сборник научных трудов  
**Труды ГГО. Вып. 580**

Подписано в печать 15.02.16. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 15,125. Тираж 300 экз. Заказ №4170.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ». 195030, Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28.