

Федеральная служба по гидрометеорологии  
и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. Воейкова

Выпуск  
**557**

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

Санкт-Петербург  
2008

УДК 551.5 (09)

*Редакционная коллегия:*

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

Сборник содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований по современным проблемам изменения климата и прогноза погоды, атмосферной диффузии и мониторинга состояния атмосферы, климатологии, дистанционного зондирования атмосферы.

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

Рекомендуется аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory

*Editorial Board:*

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

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

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

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

© Государственное учреждение „Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова”, 2008

УДК 551.588

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРИОРИТЕТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЛИМАТА**

*В. М. Катцов, В. П. Мелешко*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

*Изложены взгляды на современные приоритеты науки о климате. В свете задач, стоящих перед фундаментальной наукой о климате, кратко охарактеризованы существующие потребности в развитии наблюдений за климатической системой; перечислены проблемы, требующие дальнейших исследований; обсуждаются направления развития физико-математического моделирования климата, включая совершенствование вычислительных стратегий. Делается вывод о неотложной необходимости разработки и реализации национальной программы климатических исследований, являющейся неотъемлемой частью национальной стратегии России в отношении изменений климата.*

## **CURRENT PRIORITIES OF CLIMATE SCIENCE**

*V. M. Kattsov, V. P. Meleshko*

Voikov Main Geophysical Observatory

*A view is presented on current priorities of climate science. In the light of tasks facing the climate basic science, existing needs are briefly characterized in developing observations of climate system; problems are listed calling for further research; future directions are discussed of climate numerical modeling including refining computational strategies. A conclusion is made on urgency of developing and implementing a national programme of climate research as an integral part of the national strategy of Russia with regard to climate change.*

## Введение

Современная наука предоставляет все более веские доводы в подтверждение того, что парниковые газы, накопленные в атмосфере в результате хозяйственной деятельности человека, оказывают заметное влияние на климат. Согласно оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2007), с достоверностью более 90 % антропогенный фактор вносит основной вклад в глобальное потепление, наблюдаемое с середины XX века. Вероятность усугубления антропогенных изменений климата в течение XXI века также превышает 90 %. Особую озабоченность МГЭИК вызывает беспрецедентно высокая скорость изменения глобального климата, наблюдаемая в течение нескольких последних десятилетий. Как показывают прогностические оценки, она с высокой вероятностью сохранится, по меньшей мере, в ближайшие десятилетия.

Глобальное потепление создает для России — с учетом ее размеров, географического положения, разнообразия климатических условий, структуры экономики, демографических проблем и геополитических интересов — новую ситуацию, когда изменение климата становится существенным фактором внутренней и внешней политики. Игнорирование проблемы изменения климата, бездействие, оправдываемое ее недостаточной изученностью, чреваты серьезными последствиями в отношении устойчивого развития и безопасности страны. Однозначная оценка последствий ожидаемого потепления для нашей страны (в целом выгодно или вредно), по-видимому, в принципе невозможна, если учитывать сложность взаимодействия разных факторов на ее огромной территории (живая и неживая природа, природа и человек), этическую сторону проблемы (риск уничтожения тех или иных биологических видов, возможность катастрофических последствий для населения отдельных регионов и т. п., с одной стороны, и новые экономические возможности, с другой), политические факторы (мировая энергетическая безопасность, отношения с развитыми и развивающимися странами в рамках международных усилий по смягчению антропогенной нагрузки на климат и т. п.). Все это обуславливает необходимость формирования независимой, тщательно проработанной и научно обоснованной позиции руководства России в отношении проблемы изменения климата.

Практически все органы государственной власти нашей страны заинтересованы в получении *физически обоснованной* количественной картины будущих изменений климата, в снижении существующих неопределенностей и в пространственно-временной детализации климатических прогнозов. Это может быть обеспечено лишь отвечающими мировому уровню скоординированными и сфокусированными исследованиями в рамках *национальной программы исследования климата*. Настоящая работа, в которой изложены взгляды на приоритеты современной фундаментальной науки о климате, является одним из первых шагов в направлении создания такой программы.

### **Задачи, стоящие перед современной наукой о климате**

Среди огромного числа фундаментальных задач, связанных с исследованием климатической системы, центральной является проблема *предсказания климата* — т. е. статистического описания будущих состояний климатической системы в терминах среднего и изменчивости различных характеристик ее компонентов за период времени от нескольких месяцев до тысяч лет и более. Этой задаче подчинены все существующие направления фундаментальной науки о климате — от анализа и интерпретации данных наблюдений до исследований чувствительности к внешним воздействиям и предсказуемости климатической системы.

Климатическая система — это сложная система, поведение которой определяется взаимодействием ее пяти компонентов: атмосферы, океана, криосферы, биосферы и деятельного слоя суши. Характерное время релаксации этих компонентов к внешнему (в том числе, антропогенному) воздействию различается на несколько порядков. Благодаря нелинейности процессов, протекающих в указанных средах, и многообразию обратных связей, возникающих при их взаимодействии, в климатической системе возбуждаются сложные собственные колебания самых разных временных масштабов. Чтобы понять и предсказать поведение столь сложной системы под влиянием тех или иных внешних воздействий, необходимо использовать сложные физико-математические модели, описывающие процессы в указанных средах и взаимодействия между ними с достаточной степенью достоверности и детализации.

Уже несколько десятилетий исследования климата относятся к сфере высоких технологий. Это, прежде всего, космические технологии, призванные обеспечить максимально полную и детальную информацию о состоянии и эволюции климатической системы, а также компьютерные технологии, без которых немислимы как мониторинг, так и физико-математическое моделирование (и прогнозирование) климата, основанное на использовании постоянно совершенствующихся климатических моделей.

Исследования климата по сути своей интернациональны, поэтому приоритетные задачи, стоящие перед российской наукой, в большинстве своем не отличаются от задач, формулируемых международными программами исследований климата. Однако особенности географического положения России и климатических условий на ее территории выдвигают на передний план некоторые исследования (например, криосферы), менее актуальные для многих других регионов мира. Ниже приводится краткий обзор вопросов, требующих решения, в приоритетном порядке. Этот обзор в значительной степени опирается на заключения 4-го Оценочного доклада Первой рабочей группы МГЭИК (IPCC, 2007).

#### **Наблюдения за эволюцией климатической системы**

Полноценные исследования климата невозможны без разработки, развертывания, интегрирования и поддержания устойчивого функционирования базирующихся на разных платформах компонентов комплексной системы наблюдений за климатом. При этом потребности науки о климате не исчерпываются повышением точности, репрезентативности, пространственно-временной детализации наблюдений и расширением списка наблюдаемых климатических характеристик. Потребность в *долговременных и однородных рядах наблюдений* является ключевой и находится в очевидном противоречии с потребностью в модернизации и расширении существующих сетей наблюдений. Важной проблемой эмпирических исследований изменений климата является приведение в соответствие данных наблюдений за климатом из всех доступных источников, включая так называемые косвенные данные, характеризующие эволюцию климатической системы до начала инструментальных наблюдений и являющиеся одним из главных ресурсов палеоклиматологии.

России, прежде всего, требуется обеспечить функционирование наземной сети реперных станций, имеющих длинные ряды наблюдений за климатом на всей ее территории, и особенно на Крайнем Севере, где существующая сеть остается редкой, а ожидаемые изменения климата особенно значительны. Проектом технического перевооружения организаций Росгидромета предусматривается внедрение в течение нескольких лет автоматизированных метеорологических комплексов и автоматических станций на наземной метеорологической сети; при этом приоритет отдается климатическим станциям ГСНК и региональным опорным климатическим станциям. В соответствии с рекомендациями ВМО необходимо обеспечить достаточный период сравнительных наблюдений на станциях климатической сети традиционными методами и автоматизированными комплексами для обеспечения однородности рядов наблюдений.

Некоторые виды наблюдений требуют дополнительных методологических исследований. Так, остается достаточно сложной проблема измерения осадков (в особенности, твердых осадков в сочетании с сильным ветром). Несмотря на быстрое развитие сети наблюдений за многолетней мерзлотой, в том числе в северной части Евразии, геокриология продолжает испытывать острый недостаток данных наблюдений. Такое положение приводит к необходимости развития методов обработки и использования данных, полученных из разных источников для различных географических масштабов, и сочетания их с математическим моделированием с целью наилучшего использования ограниченного объема эмпирической информации.

Низкая плотность сети наблюдений на Крайнем Севере и в восточной части России требует дальнейших усилий по развитию климатической сети в этих районах и одновременно более широкого привлечения дистанционных систем наблюдений.

*Спутниковые наблюдения* открыли небывалые возможности для исследований климатической системы. Однако, помимо недостаточной продолжительности временных рядов спутниковых данных, анализ изменений климата затрудняется их интерпретацией в отношении целого ряда климатических характеристик и явлений. Многие важные с точки зрения понимания климатически значимых процессов характеристики в настоящее время не могут измеряться со спутников. К таким характеристикам относятся, например, толщина морского льда, водный эквивалент снежного покрова суши и др.

Создание и использование российской спутниковой системы наблюдений за климатической системой, безусловно, относится к числу важных приоритетов отечественной науки.

Имеющегося объема данных наблюдений за экстремальными явлениями пока недостаточно для их анализа и обобщения с целью получения достоверных сведений об их изменениях. Одной из причин этого является относительно небольшая повторяемость таких явлений, обуславливающая потребность в продолжительных рядах наблюдений. Пространственно-временные масштабы некоторых явлений также затрудняют их интерпретацию в контексте меняющегося климата. Так, имеющихся в настоящее время сведений о штормовых явлениях, граде, грозах и пылевых бурях недостаточно для обнаружения трендов повторяемости и интенсивности этих явлений.

Данные наблюдений за термохалинной структурой и циркуляцией Мирового океана отличаются неравномерным покрытием, и для многих регионов их ряды крайне ограничены по времени либо они совсем отсутствуют. Это создает трудно преодолимые проблемы в оценке внутривековой изменчивости и трендов крупномасштабной циркуляции (в частности, меридионального переноса тепла в Северной Атлантике или аномалий солёности в Северном Ледовитом океане и субарктической Атлантике), а также уровня океана.

### **Проблемы, требующие дальнейших исследований**

К числу главных неопределенностей прогностических оценок изменений климата относятся будущие изменения *источников и стоков парниковых газов*. Велики неопределенности пространственно-временных распределений *аэрозолей*, а изученность их климатически значимых химических, микрофизических и оптических свойств недостаточна. В частности, уровень понимания радиационных эффектов взаимодействия облаков с аэрозолями остается невысоким. Не вполне ясны причины наблюдаемых изменений содержания водяного пара в стратосфере, озона в тропосфере, а также атмосферного метана. В уточнении нуждаются количественные оценки радиационного воздействия, обусловленного свойствами подстилающей поверхности и ее взаимодействием с атмосферой. Обратные связи между климатическими изменениями, загрязнением атмосферы и эволюцией озонового слоя



определяют еще одно приоритетное направление исследований климатической системы.

Исследования *углеродного цикла*, получение информации о характеристиках растительного покрова суши, землепользовании, биологических и экологических процессах необходимы для получения количественных оценок поступления в атмосферу парниковых газов и, таким образом, для разработки и применения сценариев выбросов (и связанных с ними других сценариев), используемых в расчетах будущих изменений климата. Предварительные оценки будущих изменений климата с учетом углеродного цикла (IPCC, 2007) указывают на снижение поглощающей способности суши и океана в отношении углекислого газа, т. е. на наличие положительной обратной связи между потеплением климата и ростом концентрации этого парникового газа в атмосфере. В контексте глобального потепления пристального внимания заслуживает роль, которую в углеродном цикле (а также, разумеется, в гидрологическом цикле) играют растительность (прежде всего, бореальный лес), болота и многолетняя мерзлота. Благодаря этому в фокус соответствующих приоритетных исследований попадает большая часть территории России.

Проблемы предсказания *быстрых (внезапных) климатических изменений*, в том числе в результате изменений крупномасштабной циркуляции Мирового океана, а также неопределенности влияния изменений баланса массы и динамики ледяных щитов Гренландии и Антарктиды на колебания *уровня океана*, радикально расширяют временные рамки изучения эволюции климатической системы. Здесь, как и в исследованиях естественной изменчивости климатической системы, в том числе под влиянием астрономических факторов, важная роль принадлежит *палеоклиматологии*.

Последние годы отмечены значительным прогрессом в *обнаружении и установлении причин изменений климата* на основе анализа данных наблюдений и результатов физико-математического моделирования. Однако для временных масштабов менее полувека и пространственных масштабов, меньших, чем континентальные, возможности обнаружения и установления причин изменений климата ограничены — даже в отношении приземной температуры воздуха, не говоря уже об осадках или атмосферном давлении и, тем более, об экстремальных явлениях. Эти ограничения связаны с неопределенностями локаль-

ных особенностей внешнего воздействия и соответствующего отклика, рассчитываемого климатическими моделями, а также с неопределенностями модельного воспроизведения собственной изменчивости климатических характеристик.

*Чувствительность* климатической системы к внешним воздействиям, таким как рост содержания парниковых газов в атмосфере, определяется действующими в ней разнообразными обратными связями. К числу компонентов климатической системы, традиционно рассматриваемых в контексте исследования обратных связей, относятся водяной пар, криосфера и облака. Последние по-прежнему остаются источником наибольшей неопределенности теоретических оценок чувствительности. Разумеется, в климатической системе действуют и другие обратные связи, включающие, например, биогеохимические процессы, термохалинную циркуляцию океана (в том числе, процессы вертикального перемешивания) и т. п. Вопрос о том, насколько может быть уменьшена связанная с чувствительностью неопределенность реакции климатической системы на внешние воздействия, остается одним из наиболее важных, стоящих перед современной наукой о климате.

Проблема *предсказуемости* климатической системы венчает собой перечисленные приоритеты фундаментальных исследований климата. Она остается чрезвычайно актуальной для оценок будущих климатических изменений *на десятилетия и столетия*, однако в настоящее время особую остроту приобрела потребность в прогнозах климата с заблаговременностью *от сезона до нескольких лет*. Очевидно, с точки зрения предсказуемости в указанном временном диапазоне различные климатические характеристики (так же как и различные регионы Земли) имеют неодинаковый (и зачастую довольно ограниченный) потенциал. Поскольку речь идет о временных масштабах, на которых собственная изменчивость климатической системы и отдельных ее компонентов, как правило, существенно превышает сигнал от внешнего воздействия, задача прогноза на срок от сезона до нескольких лет представляется чрезвычайно сложной. Исследования в этой области, скорее, призваны более четко очертить теоретические границы невозможного, нежели обеспечить поступательное увеличение заблаговременности и точности прогнозов.

Большое значение при решении этой задачи приобретает совершенствование технологий *инициализации* климатических моделей и

*ассимиляции* (усвоения) данных наблюдений. Вообще, одной из важнейших задач физико-математического моделирования является построение модели климатической системы, усваивающей всю доступную информацию из наблюдений\* (в частности, для океана) и дающей так называемый бесшовный прогноз ее состояния (на срок от сезона до столетия и более).

На передний край запросов человечества в адрес науки о климате выходят прогнозы изменений вероятности *экстремальных климатических явлений*, имеющих большие социально-экономические и экологические последствия. К таким явлениям относятся засухи, наводнения, тепловые волны, ураганы и др. Необходимо продвинуться в понимании того, как собственная изменчивость климатической системы влияет на повторяемость экстремальных явлений, и получить количественные оценки этого влияния. Необходимо также исследовать, как антропогенные изменения климата влияют на собственную изменчивость климатической системы и соответственно на экстремальность климата в различных регионах.

В последнее время в связи с осознанием болезненности (для национальной экономики многих стран) мер по уменьшению антропогенной нагрузки на климат в виде сокращения эмиссий парниковых газов получило новый импульс так называемое *геоинженерное направление* науки о климате, рассматривающее альтернативные возможности уменьшения глобального потепления (Crutzen, 2006). Некоторые из таких возможностей предполагают дополнительные антропогенные воздействия на климатическую систему с целью «компенсации» парникового эффекта без сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу.

Исследования и оценка последствий применения тех или иных геоинженерных подходов невозможна без глубокого и тщательного научного анализа. Современный уровень понимания возможных последствий «компенсирующих» воздействий на климатическую систему не

---

\* Важной задачей является интеграция физико-математического моделирования и наблюдательных систем. Наблюдения играют, по крайней мере, две ключевые роли с точки зрения моделирования: помимо вышеупомянутой инициализации, они необходимы для оценки качества моделей (Катцов, Мелешко, 2004). В свою очередь, модельные расчеты могут быть полезны в оптимизации и развитии наблюдательных сетей, а также в интерпретации результатов наблюдений.

позволяет в обозримой перспективе выходить за пределы чисто теоретических исследований с использованием сложных физико-математических моделей климатической системы в качестве инструментов этого анализа.

Во всех перечисленных направлениях исследований ключевую роль играет физико-математическое моделирование климатической системы. Оно состоит, прежде всего, в создании и развитии *сложных моделей климата*, а также в совершенствовании *вычислительных стратегий*, позволяющих оптимально использовать доступные вычислительные ресурсы.

Не вызывает сомнений, что потребность в вычислительных ресурсах, несмотря на наблюдающийся впечатляющий прогресс в развитии компьютерной техники и средств связи, будет неизбежно возрастать.

#### **Развитие физико-математического моделирования климатической системы**

Современные климатические модели основаны на хорошо известных физических законах и убедительно продемонстрировали свои возможности в расчетах основных наблюдаемых характеристик современного климата, а также его изменений в прошлые эпохи. Модели позволяют получать заслуживающие доверия (особенно, для масштабов от глобальных до субконтинентальных) количественные оценки будущих изменений климата. Достоверность таких оценок неодинакова для разных характеристик. Например, для температуры она выше, чем для количества осадков.

Вместе с тем существует ряд нерешенных проблем. Часть этих проблем обусловлена, по-видимому, недостаточным уровнем понимания физических процессов. К числу известных проблем современных климатических моделей (без учета их приоритетности) можно отнести следующие (Randall et al., 2007):

большинству моделей присущ климатический дрейф, особенно в глубоком океане;

модели демонстрируют значительный разброс интенсивности обратных связей в климатической системе;

большинство современных моделей не воспроизводят с необходимой степенью достоверности некоторые крупномасштабные моды климатической изменчивости, в частности колебание Маддена—Джулиана, периодическое блокирование атмосферной циркуляции и интенсивные осадки;

систематические ошибки в воспроизведении общей циркуляции Южного океана усугубляют неопределенность неравновесного отклика климатической системы на антропогенный рост содержания парниковых газов в атмосфере;

отсутствует система общепризнанных показателей качества моделей (при сравнении модельных расчетов с данными наблюдений), которые можно было бы использовать для уменьшения разброса оценок будущих изменений климата.

Климатические модели, предназначенные для решения приоритетных задач, перечисленных выше, должны включать более совершенные *интерактивные компоненты*, описывающие химические процессы, в том числе процессы образования, переноса и разрушения озона; биогеохимические циклы; процессы в стратосфере и др. Интерактивные компоненты современных моделей, представляющие процессы взаимодействия аэрозолей с облаками, углеродный цикл в атмосфере и океане, эволюцию климатозависимой растительности и др., нуждаются в дальнейшем развитии (Denman et al., 2007).

Особого упоминания, в том числе с точки зрения ключевых национальных интересов России, заслуживает моделирование климата *высоких широт*. К числу важных вопросов развития атмосферных компонентов климатических моделей относится надлежащее описание *пограничного слоя* и инверсий в нижней тропосфере. Маловероятно, что прогресс здесь может быть достигнут лишь за счет увеличения вертикального разрешения атмосферных компонентов климатических моделей. Недостаточное понимание физики пограничного слоя в высоких широтах требует дальнейших исследований. В значительной степени сказанное относится и к модельным описаниям многослойной арктической облачности с характерными для нее фазовыми переходами воды и низкими температурами, а также к параметризациям радиационного переноса, которые должны учитывать особенности атмосферы и подстилающей поверхности, включая их вертикальную и горизонтальную неоднородность.

Погрешности расчетов современного состояния *морского льда* с помощью современных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), а также значительные неопределенности оценок его будущих изменений оставляют большой простор для дальнейших усилий в области моделирования как собственно морского льда, так и климата высоких широт в целом.

Учитывая потенциально важную роль, которую могут играть динамические процессы в изменениях баланса массы *ледниковых щитов* Гренландии и Антарктиды и тем самым в изменениях уровня океана, необходимо развивать соответствующие криосферные компоненты климатических моделей.

В связи с перечисленными проблемами определенные ожидания связываются с проведением Международного полярного года (МППГ), начавшегося в 2007 г. Наблюдательные кампании МППГ призваны уточнить наши представления о некоторых климатически значимых процессах в высоких широтах.

Надежды на существенное повышение качества воспроизведения моделями наблюдаемого климата связываются и с улучшением их *пространственного разрешения* — как горизонтального, так и вертикального. В частности, есть основания ожидать, что улучшение разрешения позволит уменьшить систематические ошибки современных моделей при расчетах для территории России. К таким ошибкам относятся, например, занижение температуры приземного воздуха на северо-востоке ее европейской части, завышение сплоченности морского льда в Баренцевом море, смещение арктической воздушной массы в восточный сектор Арктики (приводящее, в частности, к искажению ветрового воздействия на морской лед) и ряд других.

Между тем, для моделирования ряда климатически значимых процессов, а также для получения оценок климатических изменений с необходимой для некоторых исследований детализацией нужны модели с пространственным разрешением, которое в обозримом будущем вряд ли будет достигнуто в МОЦАО. Эта ситуация создает определенные перспективы для региональных климатических моделей, имеющих в среднем на порядок более высокое разрешение по сравнению с глобальными моделями и обеспечивающих тем самым бóльшую реалистичность воспроизведения изменчивости климатической системы. Развитие таких моделей, а также других моделей, позволяющих дета-

лизировать расчеты климата в представляющих интерес регионах (например, моделей со сгущающимися сетками), несомненно, входит в число приоритетов моделирования климата.

### Совершенствование вычислительных стратегий

Как отмечалось выше, многие из сегодняшних приоритетов развития прогнозирования климата с помощью климатических моделей связаны с улучшением их пространственного разрешения, в большинстве случаев — радикальным. С другой стороны, частично неопределенность оценок будущих изменений климатической системы обусловлена ее собственной изменчивостью и не может быть устранена путем усовершенствования моделей. Решая проблему предсказуемости климата, необходимо исследовать неизбежную неопределенность, связанную с собственной изменчивостью, в вероятностном пространстве. С этой целью необходимо проводить *ансамблевые расчеты* с варьированием как начальных состояний, так и неопределенных модельных параметров — в реалистичном диапазоне либо используя различные модели (IPCC, 2007; Giorgi, 2005; Kattsov and Källén, 2005; Tebaldi and Knutti, 2007 и др.).

Для лучшего понимания собственной изменчивости климатической системы и того, как на эту изменчивость может повлиять глобальное потепление, необходимо развитие стратегии ансамблевых расчетов климата, учитывающей, в частности, различия качества, а значит и степени пригодности моделей для прогноза. В настоящее время научное сообщество стоит перед необходимостью создания системы показателей (на основе сравнения результатов модельных расчетов с данными наблюдений), которые позволили бы количественно оценивать *совокупное* качество каждой модели, а не ограничиваться оценками качества расчетов той или иной климатической характеристики в отдельности. Однако в ожидании разработки и апробации таких показателей (или, как их часто называют, *метрик*), позволяющих ранжировать модели с точки зрения достоверности рассчитываемых с их помощью будущих состояний климатической системы и соответственно распределять веса между моделями в ансамблевых расчетах (иными словами, осуществлять *объективную дискриминацию моделей*), именно средние по ансамблю оценки остаются в центре внимания исследователей. На

сегодняшний день неясно, возможна ли разработка универсальной системы метрик и позволила ли бы такая система взвешивать члены мультимодельных ансамблей или, по крайней мере, объективно оценивать пригодность моделей *для тех или иных целей* (например, для тех или иных регионов).

Воспроизведение экстремальных явлений и соответствующей статистики также требует ансамблевых расчетов. Например, в случае осадков экстремальные события могут представлять даже больший интерес, чем средние значения (Palmer and Räisänen, 2002). Число членов ансамбля, требуемое для надежной оценки распределения вероятности характеристик (явлений, режимов), зависит от конкретной климатической характеристики. Так, чтобы оценить изменения повторяемости экстремальных явлений (режимов), которые случаются редко, требуется использовать большое число членов ансамбля. Если речь идет об оценке изменения вероятности распределения часто повторяющихся явлений (режимов), число членов ансамбля может быть сравнительно невелико.

Увеличение числа членов ансамблей, как и улучшение пространственного разрешения моделей, совершенствование параметризаций или включение новых интерактивных компонентов сопряжены с ростом вычислительной ресурсоемкости соответствующих разработок и исследований. Поэтому необходима тщательно разработанная стратегия вычислений, обеспечивающая баланс между размером ансамбля, разрешением модели и сложностью модельных описаний физических процессов. К этому добавляется необходимость расчетов с варьированием модельных параметров и внешних воздействий. Все вместе позволяет рассматривать неопределенности, связанные с естественной изменчивостью, с модельной чувствительностью и с внешними воздействиями.

Наконец, оценки будущих изменений некоторых компонентов климатической системы, таких как растительный покров суши, или климатических характеристик, таких как термохалинная циркуляция или уровень океана (с учетом динамики ледяных щитов), а также некоторые виды палеоклиматических исследований, требуют проведения длительных численных экспериментов. В некоторых из таких исследований могут быть востребованы климатические модели промежуточной сложности.



На сегодняшний день в мировом сообществе модельеров нет единого мнения относительно наилучшей стратегии распределения компьютерных ресурсов между перечисленными направлениями развития моделирования (Randall et al., 2007). До недавнего времени пространственное разрешение модели являлось решающим показателем при принятии соответствующими ведомствами решений о финансировании проектов развития моделей. Некоторые сегодняшние лидеры в области развития климатических моделей продолжают ориентироваться на этот показатель как на абсолютный приоритет. Однако ставшие в последние годы очевидными новые перспективы, которые открывает перед исследователями развитие ансамблевого подхода в моделировании и прогнозе климата, позволяют ожидать в ближайшем будущем изменения этой ситуации и, не исключено, более выраженных различий между ведущими исследовательскими центрами с точки зрения приоритетов развития физико-математического моделирования климата.

### **Заключение**

Научные исследования, связанные с изменениями климата, а также наблюдения за климатической системой призваны обеспечивать процесс принятия решений и информирование национального и международного научного и других заинтересованных сообществ. В большинстве своем актуальные для России исследования климата находятся в русле задач, стоящих перед всем мировым сообществом, поэтому российские климатические исследования должны быть интегрированы в международные программы.

В свете ожидаемого глобального потепления климата в настоящее время Россия нуждается в научной концепции регионального мониторинга климата и связанной с ней политике развития всего комплекса наблюдений.

Предсказание климата и последствий его изменений — центральная задача науки о климате. В решении этой задачи высокие технологии, и прежде всего физико-математическое моделирование, не имеют альтернативы. В этой связи развитие отвечающих мировому уровню национальных климатических моделей и их использование в прогнозе климата и в других фундаментальных и прикладных климатических исследованиях должны входить в число высших приоритетов российской

науки. Это является необходимым условием формирования независимой и научно обоснованной позиции России при выработке тех или иных политических и экономических решений, связанных с адаптацией к изменениям климата, а также смягчением антропогенного воздействия на климат.

Соответствие проводимых в России климатических исследований мировому уровню, признание результатов российских исследований международным научным сообществом, а значит, и использование этих результатов в качестве аргументов в межгосударственном политическом диалоге по проблемам климата, невозможны без разработки и реализации национальной программы климатических исследований, являющейся неотъемлемой частью национальной стратегии России в отношении изменений климата.

*Работа выполнена в рамках подготовки Первого оценочного доклада Росгидромета «Изменения климата и их последствия на территории Российской Федерации» и при поддержке РФФИ (гранты 07-05-13594-офи\_ц, 08-05-00749-а и 08-05-00569-а).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Катцов В. М., Мелешко В. П., 2004. Сравнительный анализ моделей общей циркуляции атмосферы и океана, предназначенных для оценки будущих изменений климата. — *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*, т. 40, № 6, с. 647—658.

Crutzen, P. J., 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur: a contribution to resolve a policy dilemma? — *Climatic Change*, 77, 211—219, doi: 10.1007/s10584-006-9101-y.

Denman, K. L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P.M. Cox, R. E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P. L. da Silva Dias, S. C. Wofsy and X. Zhang, 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. — In: *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, et al., eds. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kattsov, V., E. Källén, 2005. Future climate change: modeling and scenarios for the Arctic. — *Arctic Climate Impact Assessment (ACIA)*. — Cambridge University Press, 99—150.

Giorgi, F., 2005. Climate change prediction. — *Climatic Change*, 73, 239—265. doi:10.1007/s10584-005-6857-4.

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 et al., eds. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Palmer, T. and J. M. Räisänen, 2002. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature*, 415, 512—514.

Randall, D. A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K. Taylor, 2007. Climate models and their evaluation. — In: *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, et al., eds. Cambridge University Press. — Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Tebaldi, C. and R. Knutti, 2007. The use of the multimodel ensemble in probabilistic climate projections. — *Phil. Trans. Royal Society A*, 365, 2053—2075, doi:10.1098/rsta.2007.2076.

УДК 551.588

## **ПОСТКИОТСКИЙ ПЕРИОД: ПОЗИЦИИ КЛЮЧЕВЫХ ИГРОКОВ**

*В. М. Катцов, С. С. Чичерин*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

*Анализируются современные политические позиции развитых и развивающихся стран в отношении смягчения антропогенного воздействия на климат после окончания действия Киотского протокола (2012 г.).*

## **POST-KYOTO PERIOD: POSITIONS OF KEY PLAYERS**

*V. M. Kattsov, S. S. Chicherin*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*Current policies are analyzed of developed and developing countries with regard to mitigation of anthropogenic effect on climate after the termination of the Kyoto Protocol (2012).*

Принятие в 1992 г. Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК) ознаменовало начало нового этапа в международных отношениях: подавляющее большинство государств мира признало глобальный характер влияния человека на климат и согласилось с необходимостью противодействия изменению глобального климата. Последовавшие вслед за принятием РКИК многосторонние переговоры показали, что для принятия решений в области противодействия изменению климата, с одной стороны, необходимы тщательные научные исследования и, с другой стороны, не обойтись без всестороннего анализа политических факторов. Практика последних полутора десятилетий показала, что область научных знаний о климате и область принятия политических решений, связанных с изменением климата, существ-

венно разделены, и между ними необходимо устанавливать тесное взаимодействие. Область такого взаимодействия можно охарактеризовать термином *политическая климатология*. Такое словосочетание отражает как признание необходимости политических решений в сфере противодействия изменению климата, так и обусловленность этих решений наличием убедительных научных оснований.

После конференции Сторон, состоявшейся в конце 2007 г. на о. Бали, Индонезия, набирает обороты новый цикл переговоров в рамках РКИК, которые должны привести в 2009 г. к подготовке нового соглашения по противодействию изменению климата взамен Киотского протокола, действие которого ограничено 2012 годом.

В настоящее время в литературе (Aldy and Stavins, 2007; Dessler and Parson, 2008; IGES, 2005; Ott, 2007) рассматривается ряд сценариев посткиотского (после 2012 г.) процесса, вероятность реализации которых оценить затруднительно. С момента принятия Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК) во многих странах приняты и опубликованы официальные документы, в которых отражены основные принципы национальной климатической политики. Даже США и Австралия, которые отказались от участия в Киотском протоколе (КП), имеют четко сформулированную позицию в вопросе об уменьшении антропогенного влияния на климат.

Практически все страны мира с доверием относятся к выводам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), представленным в ее оценочных докладах, что, в частности, нашло отражение в специально посвященной этому резолюции Конференции Сторон РКИК, состоявшейся на Бали в конце 2007 г. Отмечается наращивание усилий Сторон, направленных на сокращение выбросов парниковых газов (ПГ). Меры, предусмотренные Киотским протоколом, рассматриваются как первый шаг к существенно более радикальным долгосрочным мерам по сокращению выбросов. Принимаемые меры должны стимулировать экономию энергии и новые технологии, а также приводить к сокращению спроса на ископаемое топливо.

В целях эффективного осуществления политики и мер отмечается важность укрепления институциональных механизмов для разработки и осуществления политики, укрепления координации и связей между органами власти. Центральные правительства играют важную роль, но

возрастает и роль региональных и местных органов власти, большое значение придается консультациям и сотрудничеству с целевыми группами и заинтересованными кругами. (В качестве примера заслуживает упоминания штат Калифорния, установивший цель сокращения выбросов ПГ на 80 %, по отношению к уровню 1990 г.) Важнейшее место отводится мониторингу и оценке смягчения последствий как неотъемлемым элементам стратегий в области изменения климата.

Прослеживается тенденция к применению нового комплексного подхода, который в отличие от секторального включает поэтапное осуществление, а также комплекс мер, в котором основное внимание уделяется смягчению последствий и элементам адаптации. Подчеркивается важность межсекторальной координации, в том числе с учетом возникающих конфликтов интересов между секторами. Поэтапный подход заключается в составлении «первоначального и резервного пакета политических мер, которые будут вводиться в действие», если в ином случае не удастся достигнуть намеченных целевых показателей.

Возрастающий вклад развивающихся стран в глобальные выбросы ПГ при сохранении в этих странах национальных приоритетов социально-экономического развития приводит к различию позиций отдельных групп развитых и развивающихся стран в отношении принятия обязательств по снижению выбросов ПГ. Позиции ведущих игроков — Европейского Союза (ЕС), том числе Великобритании, а также Японии, США, Китая и Индии — в наиболее контрастной форме отражают разнообразие позиций стран по климатической политике в посткиотский период. Поэтому их позиции рассматриваются ниже более подробно.

Климатическая политика ЕС отличается высокой активностью. Стратегия ЕС в области противодействия изменению климата изложена в принятом в начале 2005 г. документе Европейской комиссии «Победа в битве против изменения глобального климата» («Winning the Battle Against Global Climate Change»), а затем, в 2007 г., в документе «Сообщение Комиссии Совету, Европейскому парламенту, Европейскому экономическому и социальному комитету и Комитету регионов: Ограничение глобального изменения климата до 2 °С. Путь вперед до 2020 г. и далее» («Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Limiting Global Climate Change to 2 degrees

Celsius. The way ahead for 2020 and beyond»)<sup>1</sup>. В этих документах подтверждается известная позиция ЕС о недопустимости антропогенного повышения глобальной температуры более чем на 2 °С, поскольку оно может привести к необратимым последствиям. В весьма категоричной форме в документах ЕС рекомендовано ответить на инновационный вызов и максимально сконцентрировать усилия на радикальном укреплении исследований в области энергоэффективности, поскольку это повысит в ближайшем будущем конкурентоспособность ЕС, создав «преимущество первого хода». *По существу ЕС декларирован призыв к новой технологической революции, который подкреплен конкретными технологическими программами с масштабным финансированием.*

В «Сообщении» указывается на необходимость в результате международных переговоров достичь снижения выбросов ПГ развитыми странами на 30 % по отношению к 1990 г. В ожидании достижения такой договоренности ЕС уже сейчас в одностороннем порядке должен взять на себя твердое обязательство снизить выбросы к 2020 г., по крайней мере, на 20 % с помощью схемы торговли эмиссиями (EU emission trading scheme, EU ETS), а также других действий в контексте энергетической политики. Такой подход, согласно «Сообщению», позволит ЕС продемонстрировать всему миру лидерство ЕС в отношении решения климатических проблем. Это также даст промышленности сигнал, что EU ETS продолжится после 2012 г. и будет стимулировать инвестиции в технологии, обеспечивающие сокращение выбросов, а также в альтернативные углеродным. *Важно при этом понимать, что торговля квотами не приводит к сокращению выбросов, а лишь тормозит их наращивание в развивающихся странах и в слабых секторах ЕС.*

Согласно «Сообщению», после 2020 г. выбросы ПГ в развивающихся странах превысят выбросы ПГ в развитых странах, а пока прирост выбросов в развивающихся странах должен начать сокращаться, с тем чтобы после 2020 г. началось их абсолютное снижение. Утверждается, что это может быть достигнуто без ущерба для экономического роста и борьбы с бедностью в развивающихся странах. К 2050 г. глобальные выбросы должны быть сокращены до 50 % по отношению к 1990 г., что подразумевает 60—80 %-ное сокращение в развитых странах и «существенное» сокращение «во многих» развивающихся стра-

<sup>1</sup> [http://ec.europa.eu/environment/climat/future\\_action.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/future_action.htm)

нах. Рыночные механизмы, такие как EU ETS, будут ключевым средством обеспечения того, что Европа достигнет этих целей с наименьшими затратами. «EU ETS будет оставаться открытой после 2012 г. для углеродных кредитов Механизма чистого развития (Clean Development Mechanism, CDM) и совместных проектов в рамках Киотского протокола.» *ЕС должен принять решение об очень существенном увеличении инвестиций в исследования и разработки в области производства и сбережения энергии.*

В 2005 г. стартовала вторая «Европейская программа по изменению климата»<sup>1</sup>. Она, в частности, содержит список мер («Policies and Measures», P&M) в отношении изменения климата: междисциплинарные, энергоснабжение, энергопотребление, транспорт, промышленность (в том числе переработка отходов), сельское и лесное хозяйство, исследования и разработки; «структурные и связывающие» фонды — всего 36 пунктов. Европейский парламент выступил с инициативой пересмотра тарифов на импорт из стран, не участвующих в КП (США, Австралия), однако Европейская комиссия решила пока не делать этого. Тем не менее некоторые отрасли и некоторые правительства остаются заинтересованными в таких мерах.

Отдельного упоминания заслуживает климатическая политика **Великобритании**. Прежде всего, следует отметить, что именно Великобритания является признанным лидером ЕС в области исследований изменения климата и его последствий. *Важнейшая характерная черта британской национальной климатической политики состоит в том, что она формируется на основе тесного взаимодействия научного сообщества и правительства.* Нельзя не отметить и того влияния на мировое сообщество, которое оказывает известный Доклад Стерна (Stern, 2007) с содержащейся в нем детальной проработкой экономических и социальных аспектов изменения климата, в том числе его отдаленных последствий. Видимо, именно этими отличительными особенностями можно объяснить влияние британской климатической политики не только на страны ЕС, но и на многие развивающиеся страны.

**Япония** признает, что реализуемая в настоящее время национальная климатическая политика и соответствующие меры не достаточны для выполнения обязательств страны в рамках КП. При взятии на себя

<sup>1</sup> <http://ec.europa.eu/environment/climat/eccp.htm>



этих обязательств Япония исходила из ожидания участия в КП США. Эти ожидания не оправдались. Географические и геофизические особенности Японии существенно сужают диапазон мер по снижению выбросов. В частности, повышенная сейсмическая активность не позволяет широко использовать ядерную энергетику. Возможности «улавливания и хранения ПГ» также ограничены. «Стартовый» уровень применяемых в Японии технологий, в том числе энергосберегающих, был уже весьма высок к моменту принятия обязательств по КП, так что соответствующая часть потенциала снижения выбросов существенно уступает потенциалу развивающихся и даже развитых стран.

Согласно опубликованному японским Институтом глобальных стратегий в области окружающей среды (IGES) документу «Азиатские перспективы климатической политики («режима») после 2012 г.» (IGES, 2005), в Японии нет единства во взглядах между различными (как правительственными, так и неправительственными) игроками относительно роли страны в международных переговорах по климату. *Отсутствие единой национальной позиции снижает значение Японии в этом процессе.* Видение посткиотского процесса в Японии двояко: с одной стороны, количественные показатели сокращений выбросов в духе КП, с другой — «гибкость», оставляющая возможность пересмотра данных обещаний. В некоторых публикациях в средствах массовой информации отмечается дрейф позиции Японии в сторону установления обязательств по снижению выбросов ПГ для развивающихся стран.

**Соединенные Штаты Америки**, как известно, вышли из КП. Тем не менее 26 ноября 2007 г. Госдепартамент США опубликовал документ «Действия США, касающиеся энергетической безопасности, чистого развития и изменения климата»<sup>1</sup>. В этом документе признается, что изменение климата — это вызов, который потребует глобального отклика. Согласно этому документу, США намерены внести свой вклад в этот отклик посредством ряда внутренних и международных инициатив. США полностью вовлечены в РКИК и намерены развивать эффективную с точки зрения защиты окружающей среды и экономически выверенную политику после 2012 г. в отношении изменения климата. США намерены достичь консенсуса в отношении нового соглашения в рамках РКИК к 2009 г. Согласно этому документу, в «портфель» поли-

<sup>1</sup> <http://www.state.gov/g/oes/rls/or/2006/75337.htm>

тических мер США входят десятки обязательных, стимулируемых или добровольных программ, связанных с выбросами, включая программу «Энергетическая звезда» («Energy Star»), внутренние метановые программы, программу экономии топлива на легких грузовиках, а также президентский план «20 за 10», который призван замедлить и в конечном итоге остановить рост выбросов CO<sub>2</sub> на транспорте за счет применения альтернативных и возобновляемых видов топлива. США вкладывает значительные средства (с 2001 г. 37 млрд. долларов) в исследования и разработки технологий, связанные с изменением климата, в международную помощь и программы стимулирования. США активно сотрудничает с разными странами и организациями в рамках различных международных групп: «Methane to Markets Partnership (M2M)», «The Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF)», «The International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE)», «The Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate (APP)» (своеобразная альтернатива КП, с участием Австралии, Канады, Китая, Индии, Японии, Южной Кореи и США). Резюмируя, можно заключить, что *США планируют принимать сильные глобальные меры вне рамок КП, не дистанцируясь при этом от РКИК.*

Существует широко распространенное мнение, что «сдержанная» политика США в отношении изменения климата в значительной мере зависит от того, к какой партии принадлежит администрация США. Ожидание изменения этой политики многими связывается с президентскими выборами 2008 г. Однако эти ожидания представляются оправданными лишь отчасти, учитывая болезненность радикальных мер по сокращению выбросов для экономики США, к тому же находящейся в настоящее время не в лучшем состоянии<sup>1</sup>.

**Развитые страны**, независимо от хода международного переговорного процесса по принятию согласованных мер по снижению выбросов ПГ, будут принимать и уже принимают меры, которые с необходимостью повысят их конкурентоспособность хотя бы в тех секторах, где решающими являются энергоэффективность и экологические требования. Ведущие зарубежные страны уже приняли политические ре-

<sup>1</sup> Вместе с тем уместно отметить, что в преддверии президентских выборов в США в 2000 г. наши американские коллеги предсказывали крутой вираж климатической и экологической политики США в случае победы Дж. Буша, что впоследствии и произошло.

шения, которые вне зависимости от развития событий ориентируют эти страны на резкий поворот в сторону повышения энергоэффективности всех секторов экономики и уменьшения национальной зависимости от традиционных энергоресурсов. Весьма показательна цитата из упомянутого выше документа Европейской комиссии («Победа...»): *«Ничего неделание не есть благоразумный выбор. Чем дольше будут откладываться активные действия, тем больше будет риск необратимого изменения климата, поскольку будет невозможна стабилизация концентраций ПГ на более низких уровнях. Наука о климате продолжает развиваться, и будущие доказательства могут обнаружить, что изменение климата происходит даже быстрее, чем это представляется сегодня. Поэтому разумная средне- и долгосрочная климатическая политика должна основываться на стратегии “открытых дверей”. Такая стратегия позволила бы продвигаться даже к более низким, чем было намечено ранее, целевым уровням концентраций, если новые научные знания укажут на такую необходимость.»*

**Китай** в ближайшие несколько лет может стать крупнейшим в мире производителем ПГ. До последнего времени политика Китая в области выбросов полностью определялась политикой в области энергетики и транспорта. Главной целью энергетической политики является сокращение стоимости энергии и повышение энергетической безопасности, преодоление негативного влияния недостатка энергии на экономический рост. Хотя эта политика и подразумевает повышение энергоэффективности, но эта задача не является центральной.

К 2020 г. Китай планирует производить 10 % энергии за счет возобновляемых источников, однако на ближайшее столетие в качестве основного источника энергии рассматривается уголь, запасы которого в Китае достаточны, чтобы сделать экономический эффект от использования возобновляемых источников незначительным. Это означает, что *выбросы ПГ могут ограничиваться, прежде всего, не за счет сокращения сжигания углеводородов, а за счет улавливания и хранения углерода.* По некоторым оценкам, существенная часть выбросов ПГ происходит на мелких электростанциях и мелких производствах. Контроль со стороны сильной центральной власти, реализующей климатическую политику на провинциальном или локальном уровнях, недостаточно эффективен из-за недостаточного стимулирования и конфликта интересов. С другой стороны, влияние общественного мнения (в том

числе в случае обеспокоенности общественности проблемой изменения климата) на климатическую политику Китая оценивается как незначительное.

В то же время проблема изменения климата попала в сферу ответственности премьер-министра КНР (образована специальная группа под его председательством) и стала предметом отчетов премьера Госсовету КНР. Соответственно министерство иностранных дел сформировало рабочую группу по международной работе в области климата под председательством министра; назначен новый специальный представитель МИД КНР по климатическим переговорам. Эти меры призваны продемонстрировать активное участие правительства в реализации национального плана и в международном сотрудничестве по проблеме изменения климата.

В 2007 г. Китай опубликовал национальную программу в отношении изменения климата<sup>1</sup>. По своей сути эта программа созвучна соответствующим программам других стран. Однако в ней отчетливо обозначены *ответственность развитых стран за происходящее потепление и соответственно призыв к развитым странам о финансовой поддержке и передаче энергосберегающих технологий развивающимся странам*. Обращает на себя внимание обозначенный в программном документе краткосрочный характер климатической политики Китая (цели до 2010 г.). Это является очевидным индикатором *открытой выжидательной позиции Китая в отношении реальной политики развитых стран*, в том числе и после 2012 г. Переговорные позиции Китая по проблеме изменения климата, как правило, совпадают с позициями других развивающихся стран.

Ключевым подходом, определяющим позицию Китая, *Индии*<sup>2</sup> и других густонаселенных развивающихся стран в переговорах по посткиотскому процессу, очевидно, будет рассмотрение доли суммарных выбросов ПГ, приходящихся на душу населения этих стран<sup>3</sup>, в сочетании с потребностями роста энергопотребления. По различным оценкам, в ближайшие 25 лет энергопотребление в Индии должно возрасти

<sup>1</sup> <http://www.china.org.cn/english/environment/213624.htm>

<sup>2</sup> <http://envfor.nic.in/divisions/ccd/ccd.html>

<sup>3</sup> Такой подход, очевидно, ставит в крайне затруднительное положение некоторые страны, включая Россию.

в 2—4 раза, что неизбежно связано с ростом выбросов ПГ. Даже при удвоении потребления энергии на душу населения Индии этот показатель останется существенно ниже, чем в развитых странах. Такой подход чрезвычайно усиливает позиции развивающихся стран в переговорном процессе.

В последние годы заметно активизировалась деятельность ряда развитых стран, направленная на оценку уязвимости и повышение адаптационной способности развивающихся стран к изменению климата. Эта деятельность проводится как в рамках Найробийской программы работ, так и вне ее рамок. В этой связи можно отметить *Иберо-Американское сотрудничество* (Испания, Португалия и все страны Латинской Америки), основной целью которого является включение вопросов изменения климата в странах региона в повестку дня политических диалогов на высшем уровне в этом регионе<sup>1</sup>. Этот сектор сотрудничества развитых и развивающихся стран находится еще в стадии становления и быстрыми темпами развивается. Для начальной стадии характерно отсутствие объективных критериев для выбора методов и средств оценки уязвимости и повышения адаптационной способности, что, подобно игре в шахматы, дает преимущество первого хода наиболее активным игрокам.

В течение нескольких лет вопросы глобального изменения климата включаются в качестве приоритетных в повестку дня ежегодных встреч лидеров *Большой восьмерки*. Не станет исключением и предстоящий в 2008 г. саммит в Японии (о чем уже были сделаны соответствующие заявления японского руководства). В этой группе ведущих стран мира можно отметить значительное расхождение в исходных позициях между странами ЕС (за принятие жестких обязательств) и США (против принятия жестких обязательств). Япония и Канада занимают промежуточную позицию, все больше склоняясь к необходимости установления обязательств для крупнейших развивающихся стран (прежде всего, Китая и Индии). В дискуссиях в средствах массовой информации вокруг встреч Большой восьмерки можно обнаружить и замечания о том, что принятые в рамках Киотского протокола механизмы торговли квотами не приводят к ожидаемым сокращениям выбросов ПГ.

<sup>1</sup> Возможно, Россия могла бы, подобно Испании, играть лидирующую роль в регионе СНГ.

При наличии серьезных противоречий в подходах ведущих мировых держав можно предположить, что *стартующий после Бали двух-летний переговорный процесс* будет очень сложным. Можно ожидать, что его итогом станет промежуточный (временный/краткосрочный) компромисс с фиксацией добровольных обязательств по снижению выбросов ПГ. Некоторые страны, как развитые, так и развивающиеся, могут предложить обязательства без указания четких количественных целевых показателей.

Анализ доступной информации об официальной позиции и публикаций о климатической политике основных мировых игроков приводит к следующим выводам.

1. Ключевыми игроками посткиотского процесса опубликованы официальные программные документы по национальной климатической политике.

2. Для программных документов ведущих развитых стран характерна опора на результаты научных исследований в области климата (климат прошлого, настоящего и будущего, изменения ландшафта и природных условий, социально-экономические, политические и экологические последствия) и энергоэффективности.

3. Для позиции крупнейших развивающихся стран в отношении «смягчения» характерно преобладание национальных приоритетов социально-экономического развития и борьбы с бедностью. Успешное решение этих задач в значительной степени обусловлено увеличением производства и потребления энергии. Поэтому в позиции развивающихся стран прослеживается педалирование мотива «дифференцированной ответственности» и «справедливости».

4. Возрастающее внимание при обсуждении национальных позиций в отношении посткиотского периода уделяется вопросам передачи технологий и адаптации к неизбежным изменениям климата, а также роли развитых стран в оказании соответствующей помощи бедным (и, таким образом, наиболее уязвимым) странам.

5. Основные побудительные рычаги механизмов гибкости КП направлены на всестороннее повышение энергоэффективности. Отсюда могут проистекать побочные следствия:

а) объективная заинтересованность в энергоэффективности выходит за рамки КП, поэтому соответствующая деятельность (в том числе США) происходит и помимо КП;

б) разработка и реализация мер по повышению энергоэффективности относится к сфере высоких технологий, поэтому передача этих технологий от развитых стран к развивающимся при сохранении существующих рыночных механизмов содержит в себе скрытый потенциал сохранения или даже возрастания технологического разрыва (и как следствие разрыва в уровне социально-экономического развития) между этими группами стран;

в) резкое увеличение мировых цен на энергоносители в дополнение к обязательствам развитых стран по РКИК и КП фактически уже привели к старту очередной технологической революции, о чем открыто заявляется, например, в официальных документах ЕС. В этом содержится серьезная скрытая угроза экономике РФ, если этот вызов не будет принят (как это уже произошло при повышении цен на нефть в 1970-е годы);

г) действующие механизмы гибкости КП (торговля квотами) не побуждают непосредственно к снижению выбросов ПГ, а лишь способствуют замедлению темпов роста этих выбросов.

6. В мировой климатической политике достаточно ярко проявляются групповые игроки, такие как ЕС, Азиатско-Тихоокеанское партнерство, Иберо-Американское сотрудничество. Эти группы формируются как по принципу географической близости, так и по групповым интересам.

7. В программных документах всех ведущих игроков подчеркивается необходимость межсекторального сотрудничества внутри стран (с обеспечением необходимой координации) и тесного международного взаимодействия.

8. Существует ряд реальных и потенциальных угроз, наличие которых не всегда отражается в официальных национальных и международных документах. К таким угрозам можно отнести, например, вынужденную массовую миграцию и конфликты из-за дефицита воды и продовольствия, расширение ареала инфекционных заболеваний, изменение мировой структуры сельскохозяйственного производства под влиянием комбинации первичных и вторичных климатических факторов. Соответствующие аргументы могут эффективно использоваться в международном переговорном процессе.

9. Решение проблем оценки уязвимости и повышения потенциала адаптации в рамках РКИК проводится в соответствии в Найробийской

программой работ. В число партнеров этой Программы входят практически все агентства ООН (WMO, UNDP, WHO, FAO, IOC UNESCO), многие межправительственные и международные организации (OECD, WWF, IPCC, GEF, IEA, GCOS, WB, EEA, IASA) и крупные исследовательские центры. Международное сотрудничество в этой сфере интенсивно развивается.

В сложившейся ситуации интересам Российской Федерации (см., например, работу Катцова и др. (2007)), очевидно, отвечали бы следующие шаги.

1. Разработка и принятие официальных документов о национальной климатической политике. Такими основополагающими документами могут стать Климатическая доктрина РФ, а также разработанная на ее основе Национальная стратегия РФ в отношении изменений климата, включающая ряд национальных программ, в том числе Национальную программу исследований климата.

2. Проведение научно обоснованной независимой оценки связанных с изменением климата выгод, угроз и уязвимости, а также адаптационного потенциала как для собственных территории и населения, так и для других стран. Наличие результатов такой оценки существенно усилит позиции РФ на международных переговорах по проблеме климата. Проведение такой оценки должно осуществляться на межведомственном уровне и координироваться Росгидрометом.

3. Проведение научно обоснованной независимой оценки собственных возможностей смягчения антропогенного воздействия на климат. Очевидным направлением усилий в этом отношении в РФ могла бы стать государственная политика повышения энергоэффективности (например, потенциал энергосбережения на транспорте, в ЖКХ, в ряде других отраслей огромен). Размеры территории страны и уровень технологического развития открывают определенные перспективы в области диверсификация производства энергии, а также «улавливания и хранения углерода». Необходимы количественные оценки соответствующих мер в терминах «затраты—эффект».

4. Взвешенный анализ перспектив развития в РФ энерго-, материало- и транспортно-емких производств, функционирование которых сопровождается значительными прямыми (производство) и косвенными (транспортировка продукции) выбросами ПГ. Более широко — анализ секторов экономики на основе индикатора «величина выброса ПГ на единицу ВВП».



5. С учетом климатической политики развивающихся стран тщательное изучение перспектив размещения на своей территории производств иностранных компаний (например, автомобилестроительных), продукция которых может в ближайшем будущем оказаться не соответствующей возрастающим стандартам развитых стран.

6. Анализ возможности лидерства РФ в группах стран, объединенных региональными или другими интересами, и использование этого лидерства в международном переговорном процессе по выработке посткиотских соглашений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Катцов В. М., Мелешко В. П., Чичерин С. С., 2007. Изменение климата и национальная безопасность Российской Федерации. — *Право и безопасность*, № 1-2, с. 29—37.

Aldy, J. E., and R. N. Stavins (Eds.), 2007. Architecture for agreement: Addressing global climate change in the Post-Kyoto world. — Cambridge Univ. Press. — 380 p.

Dessler, A. E., and E. A. Parson, 2008. The science and politics of global climate change. A guide to the debate. — Cambridge Univ. Press. — 190 p.

IGES, 2005. Asian Perspectives on climate regime beyond 2012: concerns, interests and priorities. — Inst. Glob. Env. Strategies, Hayama, Japan. — 107 p.

Ott, H.E., 2007. Climate policy post-2012 — A roadmap: The global governance of climate change. — *Tallberg Foundation*. — 43 p.

Stern, N., 2007. The Economics of Climate Change. — Cambridge Univ. Press. — 692 p.

УДК 551.509.001.57

**ЧИСЛЕННЫЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ  
ВРЕМЕННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ  
И ИХ ПРИКЛАДНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ**

*Е. И. Хлебникова*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова

*Рассматриваются основные подходы к численному стохастическому моделированию временных метеорологических рядов различного временного разрешения. Особое внимание уделяется важности правильного выбора класса моделей и их корректного тестирования, ориентированного на решение различных прикладных задач. Предложены конструктивные численные стохастические модели рядов средней суточной температуры воздуха для территории России. Выполнено сравнение прикладных возможностей моделей с точки зрения воспроизведения характеристик временной структуры, обусловленных многомерными распределениями величин в различные моменты времени. Дан пример использования численного стохастического моделирования для оценки ожидаемых изменений детализированных характеристик термического режима.*

**NUMERICAL STOCHASTIC MODELS  
OF METEOROLOGICAL TIME SERIES  
AND THEIR APPLIED POSSIBILITIES**

*E. I. Khlebnikova*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*The basic approaches to numerical stochastic simulation of meteorological time series for different temporal resolution are considered. The importance of correspondence between the model category, the criteria for testing, and the problem to solve, is underlined. Some constructive numerical stochastic models for daily mean air temperature over Russia are proposed. The models are compared from the point of view of their*

*possibilities to simulate the characteristics of time structure conditioned by joint distributions of the variable for different time moments. The example of using numerical stochastic modeling to estimate future climate changes of detailed temperature characteristics is given.*

### **Введение**

Одним из способов реализации вероятностного подхода к анализу временных метеорологических рядов и оценке различных прикладных характеристик является применение метода статистического моделирования, ориентированного на численное воспроизведение стохастических моделей метеорологических рядов. Активное использование термина *статистическое моделирование*, понимаемого как численное воспроизведение функционирования вероятностной модели некоторого объекта (Ермаков, Михайлов, 1983), началось в 1960—1970 годах. В эти же годы специалисты-климатологи указали на целесообразность широкого применения метода статистического моделирования для оценки различных климатических характеристик и решения методических вопросов (Каган, Хлебникова, 1975; Марченко, Романенко, 1975). Особую актуальность применение данного подхода приобрело с началом масштабных работ по оценке последствий изменений климата, когда генерируемые метеорологические ряды стали использоваться в качестве входных в моделях отклика (например, в моделях биологической продуктивности при моделировании динамики растительного покрова и оценки урожайности сельскохозяйственных культур, в моделях водного баланса и др. (Жуковский и др., 1992; Сиротенко, Павлова, 1986, 1991). Статистическое моделирование широко используется также для пространственно-временной детализации глобальных сценарных прогнозов изменений климата, основу которых составляют результаты применения моделей общей циркуляции атмосферы и океана, и разработки региональных сценариев изменений климата (Bartholy et al., 2001; Stardex, 2005).

В последние годы наблюдается тенденция к обновлению терминологии, вызванная, по-видимому, тем, что многие пользователи статистических методов трактуют *статистическое моделирование* как построение вероятностной модели объекта по эмпирическим данным. В современной математической литературе для обозначения моделей, ле-

жащих в основе применения метода статистического моделирования, используется, как правило, термин *численные стохастические (вероятностные) модели (numerical stochastic models)*. Для прикладных областей распространенным является применение термина *стохастические имитационные модели (stochastic simulation models)*. Оба этих термина представляются удачными, так как они подчеркивают основные особенности рассматриваемых моделей — их вероятностную природу и способ применения.

Использование численных стохастических моделей для оценки различных климатических характеристик предполагает, наряду с формулировкой вероятностной модели и определением ее основных параметров, разработку и применение алгоритма численного моделирования, соответствующего выбранной модели, с целью воспроизведения статистического ансамбля реализаций метеорологических рядов. Эти этапы неразрывно связаны и составляют единое целое, что дает основание говорить о численных стохастических моделях как о специальном виде стохастических моделей. Действительно, с одной стороны, формулировка стохастических моделей должна учитывать способ их применения (численное воспроизведение), но, с другой стороны, зачастую лишь алгоритм численного моделирования обеспечивает однозначное задание детальных особенностей вероятностной структуры моделируемых объектов (в частности, временных рядов метеорологических элементов).

В настоящее время применение численного стохастического моделирования ограничено недостаточной развитостью соответствующих моделей, степень упрощенности которых ограничивает возможности воспроизведения особенностей реальной стохастической изменчивости имитируемых процессов и препятствует их широкому использованию в прикладных целях. В то же время распространенность применения в импактных исследованиях изменений климата таких программных продуктов, как *стохастические погодные генераторы* (например, Johnson et al., 1996), без их адекватного тестирования свидетельствует о недооценке влияния качества моделирования стохастической составляющей метеорологических рядов на результаты оценки характеристик отклика. Методология тестирования предполагает в основном проверку характеристик одномерных распределений соответствующих метеорологических величин и косвенно свидетель-

стствует о возможностях использования соответствующих программных средств. Вместе с тем многие актуальные приложения стохастического моделирования требуют воспроизведения особенностей временной структуры, обусловленных многомерными распределениями метеорологических величин в различные моменты времени.

В данной работе особое внимание уделяется важности правильного выбора класса моделей и их корректного тестирования, ориентированного на решение различных прикладных задач. Методологические аспекты применения обсуждаемого подхода рассматриваются на примере построения и тестирования численных стохастических моделей средней суточной температуры воздуха.

### **Особенности моделирования временных метеорологических рядов различного временного разрешения**

Подход к численному стохастическому моделированию метеорологических рядов в значительной степени определяется требуемым временным разрешением. При рассмотрении рядов метеорологических величин месячного разрешения задача моделирования в большинстве практически важных случаев может быть сведена к воспроизведению случайных величин с заданным законом распределения. При этом месячное осреднение, как правило, дает возможность использования гауссовской модели. В случае значительных отклонений от нормального распределения учет негауссовости может быть осуществлен применением методов нормализации, наиболее распространенным из которых является метод обратной функции (Ермаков, Михайлов, 1983).

На практике при реализации метода обратной функции либо используют какой-либо способ аппроксимации эмпирической функции распределения (например, сплайновую аппроксимацию (Семочкин, 1995) или кусочно-линейную зависимость (Голубятников и др., 2002), либо относят ее к какому-нибудь семейству распределений. Для некоторых типов распределения необходимые для нормализации преобразования могут быть выполнены аналитическим способом (Болгов, 1994).

При численном моделировании метеорологических рядов суточного разрешения на достаточно длинном внутригодовом интервале задача моделирования заметно усложняется. В этом случае мы имеем де-

ло со связными случайными последовательностями, а не с отдельными случайными величинами, и при суточном осреднении гораздо больше оснований говорить о возможных отклонениях распределения от гауссовского.

В гауссовском приближении задача моделирования метеорологических рядов суточного разрешения в общем случае может рассматриваться как задача моделирования многомерного случайного вектора (Ogorodnikov, Prigarin, 1996), размерность которого равна длине ряда (здесь и далее речь идет о моделировании нормированных и стандартизованных значений метеорологических элементов; методы соответствующей параметризации будут отражены далее). Для некоторых специальных видов случайных последовательностей, например для стационарных процессов с рациональной спектральной плотностью, могут быть реализованы простые рекуррентные алгоритмы моделирования.

Гауссовская модель довольно часто используется для описания временной изменчивости температуры воздуха. Например, в известных моделях *погода—урожай* (Израэль, Сиротенко, 2003) для территории России при генерировании входных метеорологических параметров температура рассматривается как гауссовская последовательность (Сиротенко, Павлова, 1986, 1991). Возможно, такое приближение является вполне приемлемым при использовании его для описания температуры воздуха в течение вегетационного сезона. Действительно, одномерные распределения температуры воздуха в теплый сезон близки к нормальному. Однако для холодного и переходных сезонов года вероятностная структура температуры воздуха имеет определенные особенности. Хорошо известно, например, что на европейской части России зимой отмечается отрицательная асимметричность распределения, а в континентальных районах Сибири — положительная.

Численное стохастическое моделирование метеорологических рядов с учетом негауссовости принципиально отличается как от моделирования гауссовских последовательностей, так и от моделирования негауссовских случайных величин. Здесь возникают трудности двоякого рода.

Во-первых, с помощью доступных в результате наблюдений статистических характеристик практически невозможно осуществить однозначное вероятностное описание метеорологических рядов, для ко-

торых гауссовская модель является неприемлемой. Имеющийся в наличии базовый объем данных наблюдений не позволяет достоверно оценивать совместные распределения в различные моменты времени, поэтому при численном моделировании временной изменчивости рассматриваемой величины обычно ставится задача корректного воспроизведения одномерных распределений и корреляционной структуры последовательности. Остальные свойства моделей определяются особенностями используемых алгоритмов.

Во-вторых, использование нормализующих преобразований при моделировании дает возможность обеспечить согласие модельных и эмпирических одномерных распределений, однако устранение искажений в корреляционной структуре, которые обусловлены нелинейностью преобразований, не может быть осуществлено полностью. В этой ситуации можно говорить лишь о минимизации соответствующих погрешностей.

#### **Численные стохастические модели временных рядов средней суточной температуры воздуха и их тестирование**

Численное моделирование средней суточной температуры воздуха во внутригодовом диапазоне выполнялось с учетом основных особенностей этих рядов, выявленных в результате эмпирического анализа данных наблюдений за 1936—2000 гг. из архива ВНИИГМИ—МЦД (значительные внутригодовые изменения моментов, включая корреляцию, а также сравнительно малые отклонения от гауссовского распределения, которые, однако, отличаются пространственной устойчивостью). Были разработаны несколько разновидностей моделей временных рядов суточной температуры воздуха, которые характеризовались единым годовым ходом математического ожидания и дисперсии, но различались описанием структуры временной изменчивости.

Для формализованного описания эмпирических одномерных распределений в конкретный день года применялись разложения плотности распределения вида в ряд по производным нормальной плотности (Кендалл, Стьюарт, 1966). Задание параметров распределений осуществлялось на основе первых четырех моментов; при этом эмпирические данные использовались для получения осредненных за определенный промежуток времени значений начальных моментов, а далее выполня-

лась процедура восстановления годового хода моментов (как однодневных, так и смешанных) на основе сплайн-аппроксимации по осредненным значениям (Каган, Федорченко, 1975). В качестве периода осреднения значений моментов для территории России был выбран месячный промежуток. Исключением является лишь северо-восточный регион (Чукотка и прилегающие районы), где в силу большой амплитуды годового хода моментов лучше опираться на декадное осреднение.

Для численного моделирования годовых реализаций стандартизованных значений средней суточной температуры воздуха, характеризующихся внутригодовой нестационарностью, были реализованы две базовые конструктивные модели. Первая из этих моделей, которая в соответствии с используемым вычислительным подходом может быть названа спектральной, обеспечивает полное воспроизведение структуры изменчивости, задаваемой корреляционной матрицей (Evstafieva et al., 2005). Вторая модель воспроизводит упрощенное описание структуры изменчивости. При реализации этой модели фиксируются осредненные за месяц значения межсуточной корреляции, а другие особенности корреляционной структуры генерируемых последовательностей определяются конструктивными особенностями используемых алгоритмов.

Вопрос о приложениях моделей важно рассмотреть уже на этапе выбора класса моделей. Например, проверка соответствия локальных характеристик распределений фактических и модельных средних месячных температур (Голубятников и др., 2002) говорит о возможности манипулировать сгенерированными рядами в конкретных точках, но не дает оснований для анализа средних месячных температур и их устойчивости в каком-либо регионе, необходимым условием которого является учет пространственной связности рядов. Аналогично моделирование средних суточных температур без учета их коррелированности (Голубятников, 2004) существенно ограничивает возможности использования генерируемых совокупностей (например, для воспроизведения межгодовой изменчивости средних месячных значений).

Вопрос дальнейшей проверки адекватности моделей данным наблюдений также естественно рассматривать в контексте применения рассматриваемых моделей. При выборе критериев качества моделирования годовых реализаций средних суточных температур приходится учитывать: а) необходимость разумного соответствия фактического и



модельного распределений значений температуры в каждый момент времени; б) близость корреляционных матриц фактических и моделированных рядов; в) возможные особенности моделируемых совокупностей, обусловленные неполнотой вероятностного описания и конструктивными особенностями алгоритмов.

Проверка соответствия фактических и модельных распределений для отдельно взятого дня выполняется сравнительно просто, но при этом корректная интерпретация всей совокупности результатов с учетом пространственно-временной связности является затруднительной. Оценка качества воспроизведения корреляционных матриц также может быть осуществлена формализованным способом, однако выбор количественных критериев существенности расхождений целесообразно осуществлять на основе анализа климатических характеристик, связанных с коррелированностью последовательностей и имеющих вполне определенное прикладное значение. Значимость возможных различий модельных и фактических рядов, обусловленных неполнотой вероятностного описания, может быть проанализирована только при рассмотрении конкретных прикладных характеристик.

В данной работе сравнение моделей средней суточной температуры воздуха осуществлялось на основе сопоставления так называемых характеристик пересечения уровня (характеристик выбросов через уровень) (Тихонов, 1983). К этому типу статистических характеристик относятся многие важные в прикладном отношении климатические показатели, называемые обычно *характеристиками непрерывной продолжительности периодов выше/ниже критических значений* (Научно-прикладной справочник по климату СССР, 1986—1991 гг.).

В зависимости от критического уровня и длины интервала, на котором рассматриваются характеристики выбросов, вклад в изменение этих величин стохастической и детерминированной (годового хода) составляющих изменчивости температуры воздуха будет разным. В данной работе для всестороннего тестирования качества воспроизведения временной структуры средней суточной температуры в различных диапазонах использовались две группы индикаторов:

1) характеристики пересечения фиксированных ( $^{\circ}\text{C}$ ) уровней годовыми реализациями температуры воздуха без исключения годового хода (например, продолжительность вегетационного сезона, продолжительность отопительного периода и др.);

2) характеристики пересечения уровней, отражающие особенности временной структуры температуры внутримесячного диапазона.

Для первоочередного рассмотрения были взяты широко используемые в топливно-энергетическом комплексе характеристики отопительного периода, связываемого с устойчивым переходом температуры через уровень  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В отличие от средних многолетних значений продолжительности отопительного периода, которые легко рассчитываются по средним месячным значениям (Кобышева и др., 2004), изучение индивидуальных годовых реализаций и их переходов через уровень  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  порождает множество характеристик, совокупность которых дает возможность выявить детальную структуру наблюдаемой и моделируемой временной изменчивости температуры воздуха.

Для сравнительного анализа прикладных возможностей различных численных стохастических моделей рассматривались описанные выше базовые модели, их упрощенные гауссовские разновидности, а также широко распространенная авторегрессионная гауссовская модель.

Основные особенности обсуждаемых моделей, которые выявляются в результате анализа данных для европейской части России, отражены на рис. 1—3 и в табл. 1, где представлены количественные результаты сравнительного анализа, относящиеся к станции Санкт-Петербург.

Рисунок 1 наглядно демонстрирует качество воспроизведения спектральной моделью (с учетом негауссовости распределения) продолжительности периодов, связанных с переходом годовых реализаций средней суточной температуры воздуха через критический уровень  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Модельные оценки представлены здесь в виде совокупности точек, полученных в результате статистической обработки ансамбля из 100 климатических реализаций для 65-летнего периода в предположении стационарности климатического режима. Согласие эмпирических оценок, относящихся к интервалу 1936—2000 гг., и ансамбля оценок, полученных с помощью стохастического моделирования, вполне удовлетворительное. Это хорошо видно из рисунка и формально подтверждается статистическими методами (при уровне значимости 0,01 гипотеза о совпадении средних значений рассматриваемых характеристик не отвергается).

Особое внимание следует обратить на хорошее согласование эмпирических и модельных оценок продолжительности осеннего и весеннего переходных периодов (см. рис. 1). В отличие от средней продол-

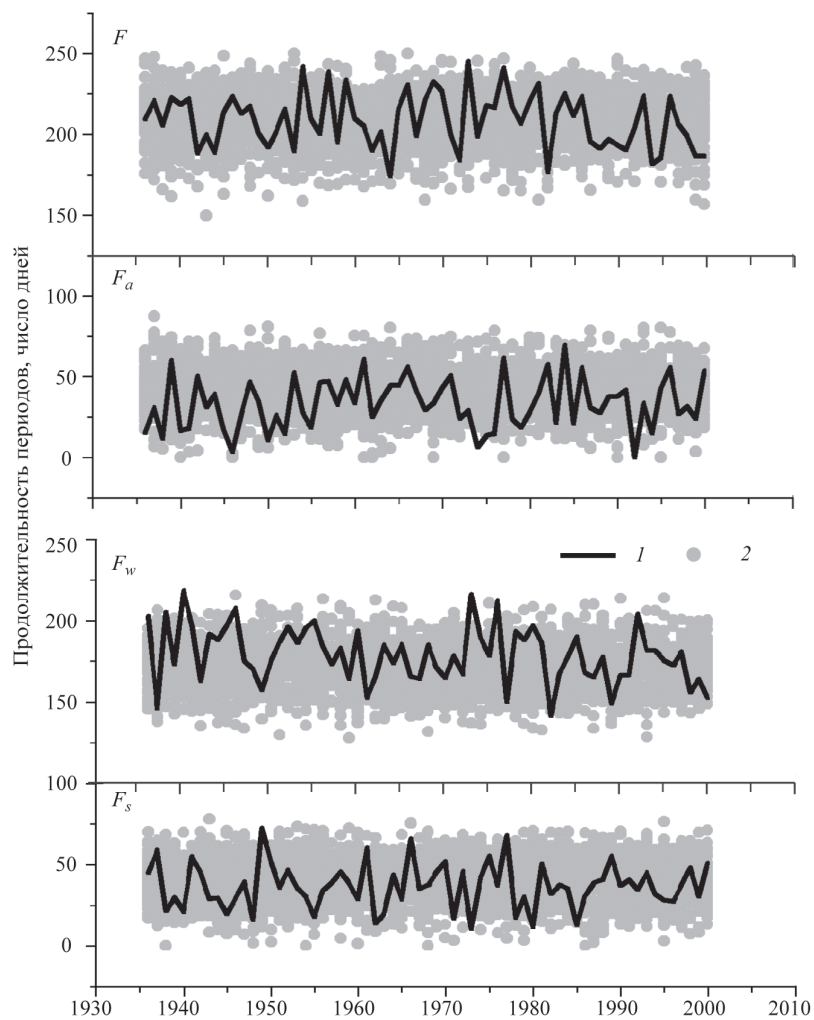


Рис. 1. Продолжительность периодов, связанных с переходом средней суточной температуры воздуха через уровень 8 °С. Санкт-Петербург.

$F$  — отопительный период,  $F_a$  — осенний период между первым и последним переходом через уровень 8 °С,  $F_w$  — зимний непрерывный период со средней суточной температурой воздуха ниже 8 °С,  $F_s$  — весенний период между первым и последним весенним переходом через уровень 8 °С.

1 — эмпирические оценки, 2 — оценки по статистическому ансамблю.

жительности отопительного периода, которая по существу определяется качеством описания среднего многолетнего годового хода, воспроизведение продолжительности переходных периодов предъявляет более высокие требования к моделям.

На рис. 2 представлены эмпирические оценки продолжительности осеннего переходного периода в сравнении с оценками, полученными с применением двух алгоритмов численного моделирования, различающихся учетом отклонений распределения от гауссовского. Сопоставление этих двух групп оценок наглядно показывает, что воспроизведение временной структуры изменчивости с помощью спектральной модели в предположении гауссовости распределения приводит к существенному завышению средних значений и дисперсий продолжительности переходных периодов.

В табл. 1 представлены количественные оценки различных характеристик перехода через уровень  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , дающие представление о воз-

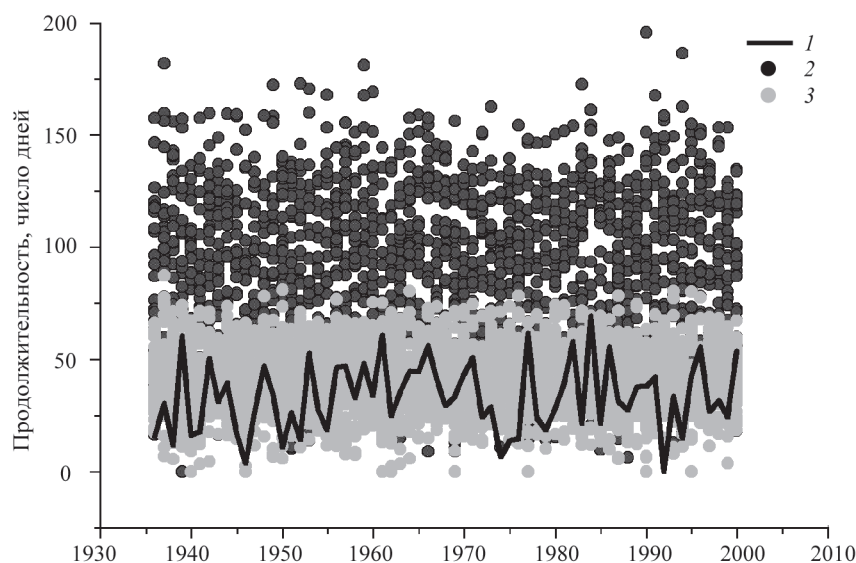


Рис. 2. Сравнительные оценки продолжительности осеннего переходного периода.

1 — эмпирические оценки, 2 — оценки по статистическому ансамблю (гауссовское приближение), 3 — оценки по статистическому ансамблю (негауссовское приближение).

возможностях стохастических моделей воспроизводить средние значения и вариабельность выбранных показателей. Наряду с оценками продолжительности периодов  $F$ ,  $F_w$ ,  $F_a$  и  $F_s$  приводятся и оценки средних значений температуры воздуха за периоды  $F$  и  $F_w$ .

Таблица 1

**Эмпирические и модельные оценки характеристик перехода через уровень 8 °С для средней суточной температуры воздуха. Санкт-Петербург**

( $m$  — среднее значение,  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение)

Оценка	Характеристик перехода					
	Продолжительность периодов				Средняя температура	
	$F$	$F_w$	$F_a$	$F_s$	$t$	$t_w$
<i>Авторегрессионная гауссовская модель</i>						
$m$	208,4	186,4	26,7	25,0	-2,0	-3,0
$\sigma$	15,7	23,5	20,8	18,0	0,9	1,0
<i>Спектральная модель (гауссовское приближение)</i>						
$m$	205,3	148,9	51,8	49,9	-2,0	-3,9
$\sigma$	23,7	43,6	36,0	33,3	1,7	1,9
<i>Спектральная модель с учетом негауссовости</i>						
$m$	207,1	178,9	32,5	36,3	-2,0	-3,4
$\sigma$	16,6	16,4	15,1	13,9	1,6	1,8
<i>Упрощенная модель с учетом негауссовости</i>						
$m$	208,1	177,7	35,4	34,0	-2,0	-3,5
$\sigma$	16,2	17,6	16,9	16,2	1,4	1,5
<i>Эмпирические данные</i>						
$m$	208,5	179,1	33,3	36,9	-1,9	-3,3
$\sigma$	17,0	17,4	15,9	14,0	1,6	1,8

Как видно из таблицы, такие характеристики отопительного периода, как средняя продолжительность и средняя температура, воспроизводятся всеми моделями одинаково хорошо, поскольку они зависят в основном от годового хода среднего значения. Однако анализ дисперсий анализируемых характеристик уже выявляет различия и показывает слабость и традиционной авторегрессионной модели (заметное занижение variability температуры в течение отопительного периода), и гауссовской спектральной модели (завышенные оценки дисперсии продолжительности отопительного периода). Особенно информативными с точки зрения сравнения моделей оказались моменты такой величины, как продолжительность периода между первым и последним переходом через заданный уровень (при осеннем понижении и весеннем повышении температуры). Сравнительные оценки продемонстрировали важность учета негауссовости при модельном описании. Результаты, полученные с помощью упрощенной модели изменчивости и спектральной модели в негауссовском приближении, оказались близки между собой и хорошо согласуются с эмпирическими оценками. Это обстоятельство может быть использовано для выделения подлежащих мониторингу климатических параметров, совокупность которых существенным образом влияет на изменение наиболее важных прикладных характеристик термического режима.

Для анализа качества численного моделирования временной структуры средней суточной температуры воздуха во внутримесячном диапазоне был выполнен расчет характеристик продолжительности периода со средней суточной температурой воздуха выше значений 90-процентных квантилей, оцениваемых для каждого дня года. При этом в качестве базовой модели для сравнения была использована упрощенная модель изменчивости с учетом негауссовости.

На рис. 3 представлены результаты сравнения эмпирических и модельных оценок средней (рис. 3 *a*) и максимальной (рис. 3 *б*) продолжительности периода со средней суточной температурой воздуха выше значений 90-процентных квантилей, которые были рассчитаны по данным за 1936—1965 гг. Поскольку в качестве уровней при анализе характеристик пересечения внутримесячного диапазона были взяты значения, меняющиеся ото дня ко дню, что позволило в первом приближении исключить влияние годового хода, с целью получения более устойчивых оценок обобщение результатов осуществлялось для теплого сезона в целом. Модельные оценки, представленные (как и на

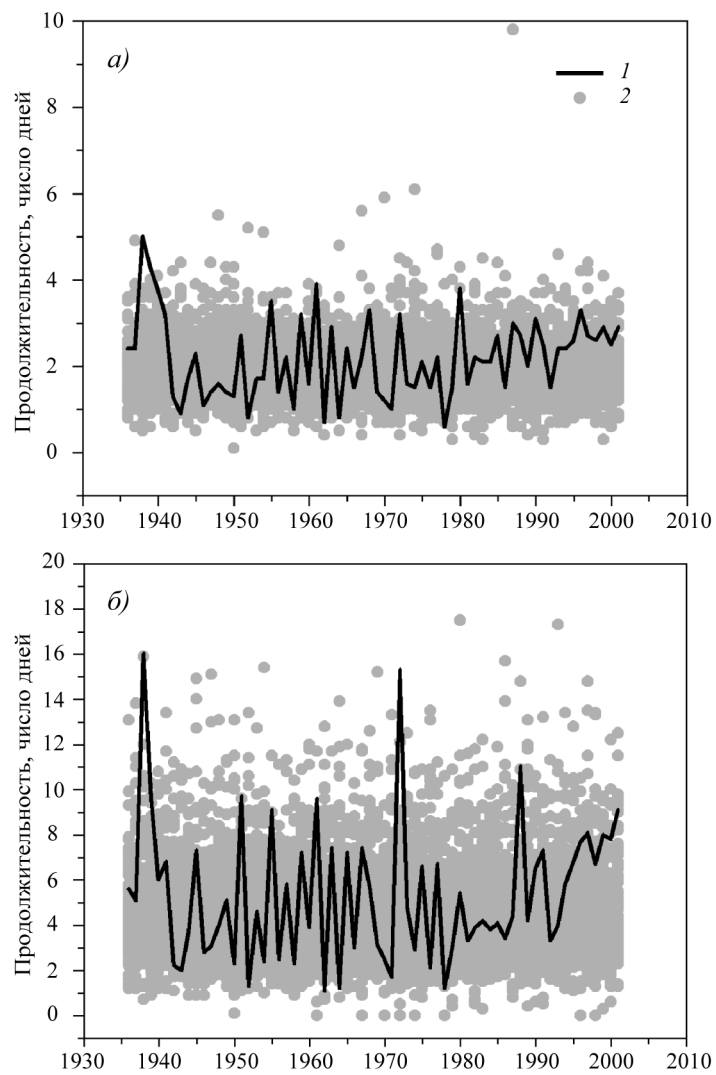


Рис. 3. Средняя (а) и максимальная (б) непрерывная продолжительность периодов со значениями средней суточной температуры воздуха выше 90-процентных квантилей. Санкт-Петербург, теплый сезон (апрель—сентябрь).

предыдущих рисунках) в виде совокупности точек, полученных в результате обработки 100 сгенерированных климатических реализаций для 65 лет, хорошо согласуются с эмпирическими данными, что может быть подтверждено и применением формальных статистических методов. Однако следует обратить внимание на то, что эмпирические данные обнаруживают тенденцию к потеплению климата, что особенно заметно проявляется в постепенном увеличении средней продолжительности периода со средней суточной температурой воздуха выше значений 90-процентных квантилей за последнее двадцатилетие. Для детального изучения влияния потепления климата на распределение соответствующих характеристик продолжительности указанного периода целесообразно проведение серии численных экспериментов с учетом нестационарности климатического режима.

### **Пример применения численных стохастических моделей**

Построение численных вероятностных моделей и их применение позволяют воспроизводить ансамбли метеорологических элементов требуемого временного разрешения и на их основе производить оценку специальных характеристик, необходимых для решения той или иной прикладной задачи. Использование данного подхода для оценки специализированных климатических характеристик в условиях меняющегося климата базируется на предположении о том, что статистические параметры влияющих метеорологических процессов могут быть разделены на две группы: 1) быстро изменяющиеся под влиянием антропогенных воздействий и прогнозируемые с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО); 2) сравнительно мало изменяющиеся, консервативные параметры, базовые значения которых могут быть оценены по современным климатическим данным.

Принципиальным является вопрос о том, какие именно параметры меняющегося климата, предоставляемые МОЦАО и связанными с ними региональными климатическими моделями, могут быть использованы при построении численных вероятностных моделей метеорологических процессов, и какая информация может быть взята из данных наблюдений. Решение этого вопроса определяется как возможностями глобальных и региональных климатических моделей воспроизводить те или иные особенности наблюдаемого климата, так и наблюдаемыми тенденциями в изменении климата.



Один из распространенных подходов основан на использовании предоставляемых МОЦАО характеристик индексов крупномасштабной циркуляции и последующем построении *условных генераторов погоды*. Границы применимости такого подхода требуют тщательных исследований для конкретных регионов, моделей и анализируемой метеорологической величины. Например, по отношению к температуре воздуха такой метод приводит к более низким значениям ожидаемых климатических изменений, чем прогнозируется МОЦАО, что может быть связано с недоучетом влияния радиационных процессов.

Альтернативный подход, используемый для временной детализации сценарных прогнозов климатических изменений, основан на доверии к оценкам климатических изменений сезонного масштаба, предоставляемым глобальными и региональными моделями, которые интерпретируются как прогнозируемые и «нормы». В рамках данной работы этот подход был применен для оценки возможных изменений детальных характеристик термического режима, соответствующих прогнозу антропогенных изменений климата на ближайшие десятилетия на территории РФ.

В результате обработки проекций изменений климата по сценарию А2 с применением совокупности МОЦАО четвертого поколения были получены оценки возможных изменений «норм» (средних за периоды 2031—2050 и 2061—2080 гг.) по сравнению с «нормами» для современного климата (средними за период 1981—2000 гг.). Различия между максимальным и минимальным изменением нормы, прогнозируемым с помощью этих моделей, для конкретных боксов весьма велики. Для последующей статистической интерпретации результатов моделирования необходимо проведение дополнительных исследований по определению наиболее вероятных значений отклонений норм, получению количественных характеристик неопределенности оценок и их учету. На данном этапе было осуществлено численное вероятностное моделирование и получены прогностические ансамбли специализированных характеристик термического режима в предположении, что на протяжении XXI века изменение виртуальных норм (относящихся к конкретному году, которые нельзя определить по данным наблюдений в силу нестационарности климатического режима) соответствует вековому ходу осредненных по моделям оценок.

В качестве примера на рис. 4 приведены оценки возможных изменений средних значений такой климатической характеристики, как го-

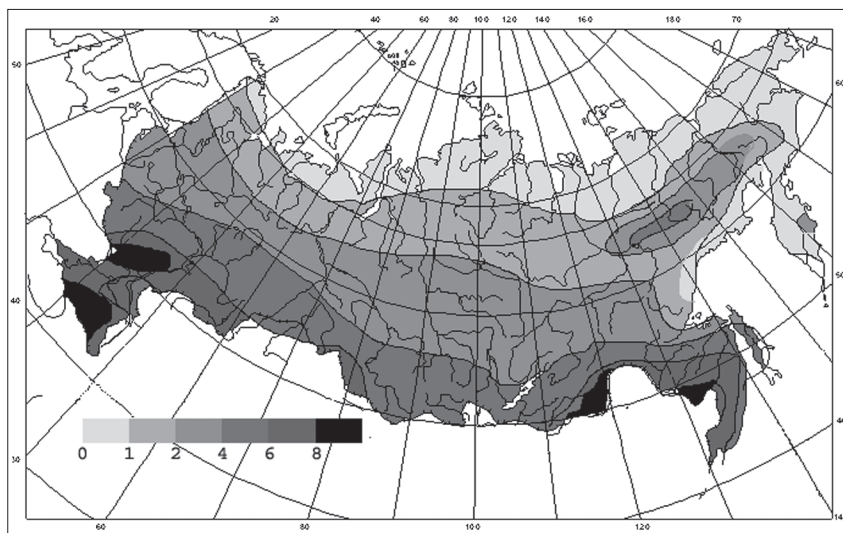


Рис. 4. Ожидаемое к 2030 г. увеличение непрерывной продолжительности (число дней) периодов с максимальной температурой, превышающей 25 °С.

довая максимальная непрерывная продолжительность периодов с суточным максимумом температуры воздуха выше 25 °С.

Обсуждаемый подход может быть применен как для определения ожидаемых изменений средних значений детализированных климатических характеристик, так и для изучения варибельности оценок различных показателей, отражающей как естественную климатическую изменчивость, так и неопределенность наших знаний об изменении климата. Получаемые при этом ансамбли оценок климатических характеристик могут быть использованы для последующего определения рисков и оптимизации климатообусловленных решений в условиях меняющегося климата.

### Выводы

Численное стохастическое моделирование является важным инструментом интерпретации данных наблюдений, и его более глубокое проникновение в область климатологии представляется весьма ак-

туальной задачей, особенно в свете происходящих и возможных в будущем изменений климата. Проведенное тестирование различных моделей температурных рядов продемонстрировало важность адекватного вероятностного описания, являющегося фундаментом численного стохастического моделирования, и необходимость корректного выбора критериев при разработке моделей, ориентированных на конкретное применение. Принимая во внимание актуальность рассматриваемого подхода, в частности, для анализа степени неопределенности оценок климатических характеристик с учетом наблюдаемых и ожидаемых изменений климата представляется целесообразным дальнейшее развитие методологии численного стохастического моделирования и систематический анализ результатов моделирования с точки зрения решения наиболее важных прикладных задач.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-05-65093, 06-05-64969, 08-05-00569).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болгов М. В., 1994. Моделирование многомерных гидрологических характеристик методом разложения по естественным ортогональным функциям. — Метеорология и гидрология, № 7, с. 82—95.
- Голубятников Л. Л., 2004. Стохастическое моделирование величин ежедневных осадков и среднесуточных температур. — Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т. 40, № 5, с. 665—677.
- Голубятников Л. Л., Ямагата Й., Александров Г. А., 2002. Стохастический генератор величин месячных осадков и среднемесячных температур. — Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т. 38, № 1, с. 47—55.
- Ермаков С. М., Михайлов Г. А., 1983. Статистическое моделирование. — М.: Наука. — 296 с.
- Жуковский Е. Е., Бельченко Г. Г., Брунова Т. М., 1992. Вероятностный анализ влияния изменений климата на потенциал продуктивности агроэкосистем. — Метеорология и гидрология, № 3, с. 18—27.
- Израэль Ю. А., Сиротенко О. Д., 2003. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России. — Метеорология и гидрология, № 6, с. 5—17.
- Каган Р. Л., Федорченко Е. И., 1975. О восстановлении годового хода моментов метеорологических рядов. — Труды ГГО, вып. 348, с. 99—111.
- Каган Р. Л., Хлебникова Е. И., 1975. О применении статистического моделирования при решении метеорологических задач. — В кн.: Применение статистических методов в метеорологии. Труды II Всесоюзного симпозиума по применению статистических методов в метеорологии. — Л., с. 36—44.

- Кендалл М. Дж., Стьюарт А., 1966. Теория распределений. М.: Наука. — 587 с.
- Кобышева Н. В., Ключева М. В., Александрова А. А., Булыгина О. Н., 2004. Климатические характеристики отопительного периода в субъектах Российской Федерации в настоящем и будущем. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 46—52.
- Марченко А. С., Романенко Т. П., 1975. Моделирование гамма-последовательностей и их использование для изучения выбросов скорости ветра. — Метеорология и гидрология, № 7, с. 54—62.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 2. 1986—1991 гг.
- Семочкин А. Г., 1995. Моделирование стохастических скалярных и векторных временных рядов. — Метеорология и гидрология, № 1, с. 18—23.
- Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 1986. Стохастическое моделирование суточных климатических данных для расчетов по динамическим моделям «погода—урожай». — Труды ВНИИСХМ, вып. 21, с. 75—83.
- Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 1991. Имитационная система «климат—урожай» СССР. — Метеорология и гидрология, № 4, с. 67—73.
- Тихонов В. И., 1982. Статистическая радиотехника. — М.: Радио и связь. — 624 с.
- Bartholy J., Matyasovszky I., Weidinger T., 2001. Regional climate change in Hungary: a survey and a stochastic downscaling method. — *Idojaras*, V.105, No 1, p. 1—17.
- Evstafieva A. I., Khlebnikova E. I., Ogorodnikov V. A., 2005. Numerical stochastic models for complexes of time series of weather elements. — *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, V. 20, No 6, p. 535—548.
- Johnson, G. L., C. L. Hanson, S. P. Hardegree, E. B. Ballard, 1996. Stochastic Weather Simulation: Overview and analysis of two commonly used models. — *J. Appl. Met.*, V. 35, p. 1878—1896.
- Ogorodnikov V. A., Prigarin S. M., 1996. Numerical modelling of random processes and fields: algorithms and applications. — VSP, Utrecht, the Netherlands. — 240 p.
- Stardex, 2005: Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions, Final Report to the European Commission (<http://www.cru.uea.uk/cru/projects/reports/stardex>).

УДК 551.55

## **ОЦЕНКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

*М. М. Борисенко, Е. О. Гобарова, Е. Л. Жильцова*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова

*Анализируются продолжительные однородные ряды измерений скорости ветра современными анеморумбометрами М63-М1 по более чем 200 метеостанциям на территории России. Впервые приводится разработанная авторами карта потенциала энергии ветра на уровне 100 м над поверхностью земли для всей территории России. Рекомендуется перечень ВЭУ мегаваттного класса. На примере территории Карелии обосновывается правомерность применения мощных ветровых установок для местности с преобладанием лесного ландшафта на побережьях крупных озер.*

## **ESTIMATION OF RUSSIAN WIND-POWER RESOURCES**

*М. М. Borisenko, E. O. Gobarova, E. L. Zhiltsova*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*Longtime homogeneous wind speed set is analyzed. Measurements were made by modern M63-M1 wind meters at more than 200 Russian weather stations. Developed by authors map of wind energy potential at 100 meters above ground level is first presented for all the country. List of wind-driven power plants (WDPP) of megawatts class is recommended. Application of WDPP for forest landscape shores of large lakes is proved by the example of Karelia.*

История развития ветроэнергетики насчитывает несколько столетий, если учитывать не только использование традиционных ветряных мельниц, но и парусного флота. С начала XX века широкое распростра-

нение получили ветровые турбины современного типа, и в результате к концу столетия суммарная их мощность в масштабе всей планеты достигла нескольких миллионов киловатт.

Благодаря принятию разумных политических решений во многих экономически развитых странах за последнее 20-летие осуществлены значительные капиталовложения в развитие ветроэнергетики, которая к настоящему времени превратилась в самостоятельную и перспективную отрасль общей энергетики в ряде государств. Комплекс специальных мероприятий в этой области позволил снизить себестоимость вырабатываемой ВЭУ электроэнергии до 4—5 центов/(кВт · ч).

Создана обширная номенклатура ветроустановок с соответствующими технико-экономическими показателями. Немалые успехи достигнуты также и в ряде стран, которые принято по привычке причислять к развивающимся. В целом наибольших успехов в вопросе использования энергии ветра в промышленных целях достигли Германия, Испания, США, Дания, Индия, Великобритания, Швеция, Нидерланды, Ирландия, Румыния. Заслуживает особого внимания динамика развития ветровой энергетики в Индии. Если в 1992 г. суммарная мощность всех функционирующих в стране ВЭУ составляла всего лишь 40 МВт, то в 1996 г. — уже 816 МВт, а к 2000 г. она возросла до 2000 МВт. Столь резкий скачок в развитии индийской ветроэнергетики был осуществлен при стабильной и эффективной поддержке государства и вследствие широкого привлечения зарубежных инвестиций.

К настоящему времени суммарная мощность всех работающих в мире ВЭУ превышает 35 тыс. МВт, причем три четверти производимой энергии приходится на страны ЕЭС. Для сравнения напомним, что номинальная мощность всех четырех энергоблоков стандартной по современным меркам Ленинградской АС не превышает 4 тыс. МВт.

Преобладающий подход к использованию ресурсов энергии ветра — создание так называемых ветровых парков. Отметим, что суммарный объем установленной мощности существующих на земле ветровых парков, работающих в составе энергосистем, составляет более 15 тыс. МВт, что в два раза превышает самые оптимистические прогнозы начала 90-х годов XX века. Упомянем еще, что сегодня ветроэнергетика обеспечивает теплом и светом около 8 млн. зданий.

В табл. 1 приводится перечень ВЭУ зарубежного производства, наиболее успешно используемых в экономической сфере. Из таблицы

Таблица 1

## Сведения о ВЭУ

Тип ВЭУ	Страна—производитель	Фирма—разработчик	$N_e$	$D$	$H$	$u_{\min}$	$u_p$	$u_{\max}$	$u_5$
MICON M 400	Дания	NEG MICON A/S	400	31	36	4	15	26	69
TW 600	Дания	NEG MICON A/S	600	43	50	3	12	25	—
WM 750	Дания	NEG MICON A/S	750	44	48	5	12	19	—
Mod-2	США	Боинг	2500	91,4	61	4	12	25	—
Mod-5B	США	Дженерал Электрон	3200	98	61	4	12	25	—
WTS-75	Швеция	Bowling—KMW	2000	75	80	6	12,5	21	—
WTS-4	США	Гамилтон	4000	78	80	5	16	27	—
NM 54/950	Дания	NEG MICON A/S	950	54/5	Пере- менная	3,5	22	25	69
NM 72C/1500	Дания	NEG MICON A/S	1500	72	62—78	4	13	25	69
W 3700-500	Дания	Wind World A/S	500	37	40	4	14	25	50
АВЭ-250 С	Украина—Россия	КБ «Южное»	200	25	25	4,5	13,5	25	60
ВЭУ-500	Украина	КБ «Южное»	500	38	35	4,5	12,9	25	50
АВЭ-100	Россия	НПО «Ветроэн»	100	25	25	3	10	25	—
Adler-25	Германия	Kosler	100	25	22	3	10,5	20	—

Примечание. В таблице используются следующие условные обозначения:  $N_e$ —установленная мощность энергоагрегата (кВт),  $D$ —диаметр роторной системы (ветроколеса) (м),  $H$ —высота башни (оси ветроколеса) (м),  $u_{\min}$ —минимальная скорость ветра (м/с),  $u_p$ —расчетная скорость ветра (м/с),  $u_{\max}$ —максимальная скорость ветроколеса (м/с),  $u_5$ —буревая скорость ветра (м/с).

можно заключить, что большинство представленных в ней установок предназначено для работы в составе ветровых парков, а следовательно, они относятся к разряду системной ветроэнергетики. Напомним, что ВЭУ подразделяются на два типа: во-первых, используемые как автономные, для обслуживания небольших хозяйственных объектов и, во-вторых, предназначенные для работы в составе энергетических систем, иначе говоря, в составе ветровых парков.

Из большого числа используемых за рубежом ВЭУ большой мощности (100—500 кВт) и мегаваттного класса в табл. 1 представлены те, которые по своим техническим характеристикам и с учетом природно-климатических условий пригодны для применения на территории нашей страны.

Уместно в связи со сказанным выше упомянуть, что по сообщениям средств массовой информации в Германии в горном районе Хунсрюк (земля Рейнланд—Пфальц) вблизи небольшого городка Морбах с населением 11 тыс. человек близится к завершению создание крупнейшей в мире ВЭУ типа FL-2005, высота оси ветроколеса которой равна 160 м, диаметр ветроколеса ~100 м. Предполагается, что годовая выработка электроэнергии составит 6 млн. кВт·ч. В этом районе уже действуют 13 ВЭУ, меньших по размерам в полтора раза.

В нашей стране исследования ветроэнергетических ресурсов были поставлены на научную основу в 20-е годы прошлого столетия. В этот период наибольший вклад в исследование ветроэнергетических ресурсов внесли работы Келлера (1930), Красовского (1923, 1936), Подтягина (1938), Симонова (1933).

Результатом проведения исследований ВЭР и разработки новых по тому времени типов ветроагрегатов явилось создание в Центральном ветроэнергетическом институте (ЦВЭИ) установок, имеющих удельную мощность вначале порядка 10—15 Вт/м<sup>2</sup>, что соответствовало установленной мощности ~90 кВт. Первая в нашей стране опытная ВЭС была построена в 1931 г. вблизи Балаклавы. Номинальная мощность Балаклавской ВЭС достигалась при скорости ветра 10 м/с. В проекте, разработанном в ЦВЭИ, удельная мощность установки должна была равняться ~1000 кВт при расчетной скорости  $u_p = 14$  м/с. Балаклавская ВЭС была закрыта в 1942 г.

В 1950-х годах в нашей стране начался новый этап в исследовании ветроэнергетических ресурсов. Здесь можно выделить, в первую оче-



редь, работы коллектива под руководством Е. М. Фатеева (Андрианов и др., 1960; Методы разработки ветроэнергетического кадастра, 1963; Фатеев, 1957).

Позднее в исследованиях в области ветроэнергетики, наряду с решением технических проблем создания новых ВЭС, большое внимание стало уделяться вопросам оптимального учета природно-климатических ресурсов в стране (Анапольская, Гандин, 1978; Зеленев, 1982; Кобышева и др., 1983; Лятхер, 1987; Сидоров и др., 1980; Шефтер, 1975).

В 80-е годы возник интерес к ресурсам энергии ветра до высоты нескольких сотен метров применительно к задаче разработки мощных ВЭУ (Агалаков, Корнюшин, 1985; Агалаков и др., 1986; Борисенко и др., 1990; Брюхань и др., 1987; Дробышев, Курыгина, 1987).

В последние 10—15 лет в ряде институтов системы Росгидромета (ГУ ГГО, ЗапСибНИИ) и ведомственных организациях выполнен обширный комплекс методических и климатологических разработок, использование которых позволило существенно уточнить особенности пространственного и вертикального распределения ветроэнергетических ресурсов (в слое атмосферы до высоты 200 м над поверхностью земли) (Борисенко, 1994, 2006, 2007; Борисенко, Прахов, 2006; Борисенко и др., 2005; Методические указания, 1991; Рекомендации по определению ветроэнергетических ресурсов, 1989; Смирнова и др., 1989; Шефтер, 1975).

Обобщение результатов проведенных за последнее десятилетие научных разработок дало возможность уточнить районирование страны по природно-климатическим ресурсам в слое атмосферы до 200 м. На рис. 1 представлено фоновое районирование страны по значению удельной мощности ветрового потока на высоте 100 м над поверхностью земли. Уточним, что в отличие от упомянутых выше публикаций, где также приводилось районирование страны по климатическим ветроэнергоресурсам, в данной работе такое районирование впервые дано для уровня пограничного слоя атмосферы. Практическое значение таких разработок очевидно, так как высота оси ветроколеса наиболее перспективных ВЭУ составляет не менее 50 м, а зачастую достигает 100—150 м.

Проведенные нами разработки показали (см. рис. 1), что на европейской части России выделяются по меньшей мере три обширных района, перспективные для развертывания ветроэнергетики в составе энергосистем.

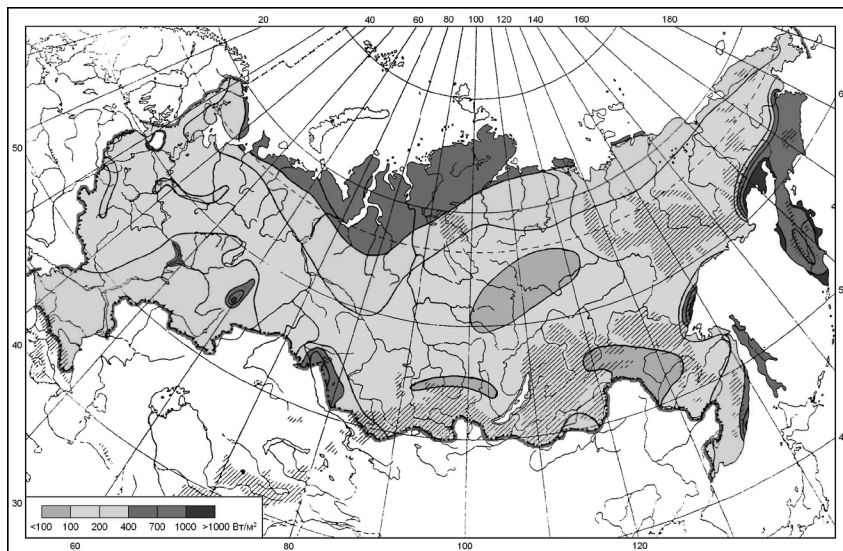


Рис. 1. Фоновое районирование территории России по значениям удельной мощности ветрового потока ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) на высоте 100 м над поверхностью земли.

Таким районом, во-первых, является мелководная зона южной части Финского залива — к югу и юго-западу от о. Котлин, а также южная часть прибрежной зоны Ладоги. В этих местах средняя годовая скорость ветра на высоте 10 м над уровнем подстилающей поверхности составляет от 6 до 8 м/с. В таких случаях установленная мощность одной ветровой установки с высотой оси ветроколеса 100 м равнялась бы  $\sim 2$  МВт. Приведенное значение характеризует технический ветроэнергетический потенциал, в то время как природно-климатический потенциал энергии составляет  $\sim 5$  МВт. Иными словами, КПД установки составит 0,4.

Выявлено, что коэффициент использования установленной мощности для этих условий  $K_u$  равен 0,45—0,50, т. е. используемая часть технического потенциала подобной установки равна 0,9—1,0 МВт.

Вторым районом европейской части России, перспективным для системной ветроэнергетики, являются участки побережья и мелководные зоны акватории Азовского моря к югу и к северу от Керченского пролива. Установленная мощность здесь такая же, как и в первом

районе, однако коэффициенты использования  $K_y$ , несколько ниже: 0,35—0,40.

Третий перспективный для ветроэнергетики район на европейской части России — это предгорья Северного Кавказа, включая прибрежную часть Каспия и междуречье Дона и Волги. В этом районе коэффициент использования установленной мощности, по данным расчетов авторов, составляет 0,40—0,45, т. е. при использовании шведской установки WTS-75-2 используемая мощность одной ВЭУ равна 0,8—0,9 МВт.

В пределах азиатской части России перспективными являются три района. Первый охватывает побережье Охотского моря вблизи Магадана, где средняя годовая скорость ветра на высоте 10 м составляет 8 м/с и более, а на высоте 100 м — 10—12 м/с. В этих местах значение  $K_y$  находится в пределах 0,45—0,50, а значит, используемая мощность установки WTS-75-2 будет равняться 0,9—1,0 МВт. Не менее перспективными являются южные районы Приморского края Дальневосточного региона, преимущественно те, что прилегают к побережью Японского моря, и острова, расположенные в заливе Петра Великого, где на высоте 10 м над уровнем подстилающей поверхности скорость ветра в среднем составляет 7—8 м/с, а на высоте 100 м 9—11 м/с. Используемая мощность при условии применения установок WTS-75-2 составляет ~1,0 МВт на высоте 100 м.

Из рис. 1 видно, что весьма значительными ветроэнергетическими ресурсами обладают также наветренные и параллельные господствующим направлениям ветра пологие склоны невысоких горных отрогов Южного Урала. В средних и верхних частях таких отрогов средняя годовая скорость ветра в приземном слое составляет от 7 до 10 м/с. На высоте 100 м над склоном и вершинами пологих возвышенностей скорость ветра в среднем за год составляет 12—13 м/с. На указанном уровне значение  $K_y$  достигает 0,5, т. е. в случае применения шведской установки WTS-75-2 используемая часть технической мощности равна 1 МВт.

Следует заметить, что на сегодняшний день опыт применения ВЭУ в нашей стране невелик. Однако, по последним данным, ВЭУ большой мощности функционировали в отдельных местах достаточно успешно, и в частности вблизи западной оконечности о. Котлин, в северной части Ижорской возвышенности, к западу от райцентра Гатчи-

на, на отдельных участках п-ва Чукотка. С помощью инвестиций зарубежных фирм в течение нескольких лет функционировала ВЭУ средней мощности (около 200 кВт) в Мурманске, обеспечивая электроэнергией несколько многоэтажных жилых домов. В последние годы усилиями организации «Ветросвет» были достигнуты ощутимые успехи в создании и внедрении в практику ВЭУ автономного использования мощностью от 100 Вт до 100 кВт для обеспечения потребностей в энергии удаленных от энергосистем небольших хозяйств и жилых строений в сельской местности, главным образом в пределах Ленинградской области. В настоящее время действует несколько сотен подобных установок.

В настоящее время у части общественности, в том числе научной, сложилось устойчивое мнение о том, что большинство регионов России неперспективны в ветроэнергетическом отношении. Почему-то к числу таких регионов относят и Карелию. Наши разработки, однако, показали, что в местах расположения крупных озер, а они занимают значительную часть территории Республики Карелия, ветроэнергетический потенциал вполне достаточен для размещения там крупных ВЭУ. Установлено, что на многих островах и побережье Ладоги и Онеги на высоте 10 м средняя годовая скорость ветра составляет  $\geq 6$  м/с (рис. 2). Это указывает на то, что на уровне 100 м скорость ветра в среднем 7—8 м/с. Все это относится не только к Ладоге и Онеге, но и большинству других крупных озер Карелии, таким, например, как Сегозеро, Топозеро, озера Нижнее и Верхнее Куйто и многие другие.

По мнению экспертов Британской ветроэнергетической ассоциации, перспективными могут считаться ВЭУ большой мощности и мегаваттного класса только в тех случаях, когда на уровне оси ветроколеса средняя годовая скорость ветра составляет 7 м/с и более.

Из табл. 2 видно, что лишь примерно 40 % представленных в ней пунктов на побережьях крупных водоемов Карелии отвечают упомянутым требованиям.

Используя данные табл. 2 и методику, изложенную в Атласе ветров России (2000), созданном творческим коллективом ГУ ГГО и РДИЭЭ, авторы настоящей работы произвели экстраполяцию ветроэнергетического потенциала на ряде крупных водоемов Карелии вплоть до высоты 200 м над подстилающей поверхностью. Полученные результаты приведены в табл. 3.

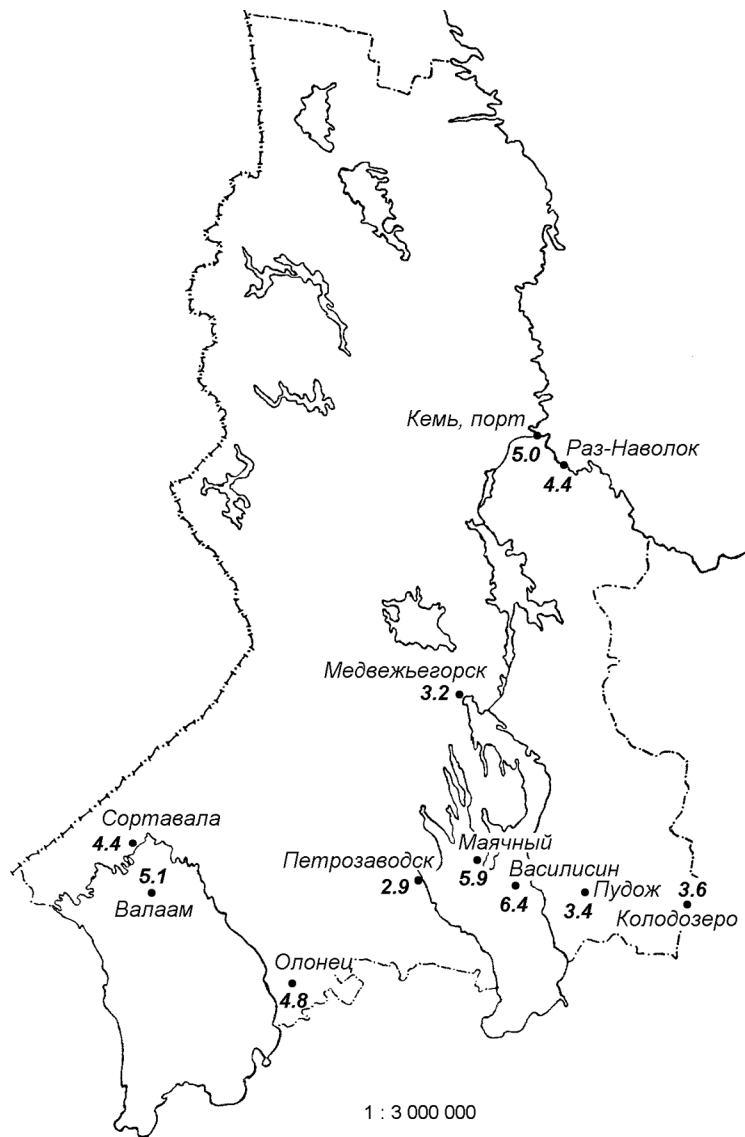


Рис. 2. Среднегодовая скорость ветра на высоте 10 м на водоемах Карелии.

Таблица 2

**Распределение средней годовой скорости ветра (м/с) по высоте. Карелия, 1961—1994 гг.**

Пункт	Высота, м					
	10	30	50	70	100	200
о. Валаам	5,1	6,0	6,5	7,0	7,4	8,7
Василисин	6,4	7,6	8,1	8,8	9,3	10,9
Маячный	5,9	7,0	7,5	8,1	8,6	10,1
Раз-Наволоок	4,4	5,2	5,6	6,0	6,4	7,5
Петрозаводск	2,9	3,6	4,0	4,4	4,7	5,9
Сортавала	4,4	4,9	5,2	5,4	5,6	6,2
Колодозеро	3,6	4,0	4,2	4,4	4,6	5,1
Пудож	3,4	4,2	4,7	5,1	5,5	6,7
Олонец	4,8	5,3	5,6	5,9	6,1	6,7
Медвежьегорск	3,2	3,9	4,4	4,9	5,3	6,5
Кемь-Порт	5,0	5,7	6,2	6,6	7,0	8,2

Таблица 3

**Распределение природно-климатического потенциала энергии ветра (Вт/м<sup>2</sup>) по высоте. Карелия, 1961—1994 гг.**

Пункт	Высота, м					
	10	30	50	70	100	200
о. Валаам	246	378	452	520	612	975
Василисин	346	529	637	730	862	1370
Маячный	262	401	482	553	652	1038
Раз-Наволоок	190	291	350	400	473	752
Петрозаводск	31	53	68	83	109	219
Сортавала	103	137	159	175	209	299
Колодозеро	69	92	106	124	141	203
Пудож	63	107	133	172	209	423
Олонец	147	195	226	262	297	427
Медвежьегорск	48	75	94	126	148	297
Кемь-Порт	148	198	229	266	301	427

При размещении ВЭУ мегаваттного класса следует придерживаться правила, в соответствии с которым предпочтительно, чтобы установка располагалась с наветренной стороны озера, ибо тогда ветровой поток получает наибольший разгон. В основном такими местами являются восточные участки побережий крупных озер Карелии, где на высоте 50—100 м значение  $K_y$  составляет около 0,3. Это означает, что при использовании ВЭУ MICON M 400 установленная мощность  $N_e$  равна 400 кВт, используемая практически — около 150 кВт. Для установок WTS-75-2 используемая мощность составляет около 700 кВт.

Следует также отметить стабильность ветрового режима в Карелии. Данные, представленные на рис. 3, свидетельствуют о том, что межгодовая изменчивость скорости и потенциала энергии ветра невелика (стандартные колебания ~10 %), причем с 80-х годов намечается, хотя и слабо выраженный, положительный тренд.

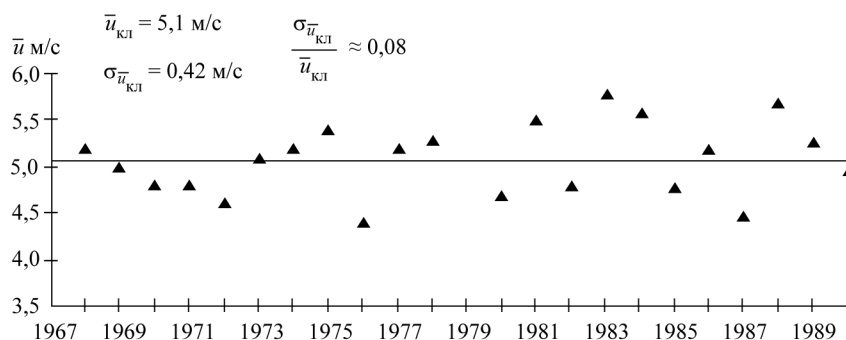


Рис. 3. Межгодовая изменчивость средней скорости ветра на высоте 10 м на Валааме.

Тонкая линия — климатическая норма за 1968—1990 гг.

При построении графика на рис. 3, равно как и табл. 2 и 3, использовался 30-летний ряд измерений ветра, рекомендованный ВМО в качестве основного климатического ряда.

В заключение сформулируем кратко основные положения настоящей работы.

1. Впервые в практике отечественных исследований в области климатических ветроэнергоресурсов России сформированы однород-

ные ряды данных по характеристикам ветра на основе измерений на метеостанциях Росгидромета современными анеморумбометрами М63-М1 для всей территории страны. Число таких станций в общей сложности превышает 200.

2. Используя упомянутые анемометрические данные, с помощью логарифмического и степенного законов возрастания скорости ветра с высотой авторы впервые получили значения ветроэнергетического потенциала на высотах до 200 м над всеми регионами России. Впервые разработано районирование ветроэнергетического потенциала России для уровня 100 м над подстилающей поверхностью.

3. Сформулированы рекомендации по выбору и размещению на территории страны ВЭУ мегаваттного класса с высотой оси ветроколеса 100 м над поверхностью земли.

4. Обоснованы возможности практического использования ВЭУ большой мощности на считавшейся до сих пор малоперспективной в ветроэнергетическом отношении части Карелии, где имеются крупные озёрные системы, и на побережье Белого моря.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агалаков В. С., Корнюшин О. Г., 1985. Климатические характеристики ветра в пограничном слое атмосферы над СССР в связи с оценкой ветроэнергетических ресурсов. — Труды ВНИИГМИ—МЦД, вып. 125, с. 3—10.
- Агалаков В. С. и др., 1986. Оценка природных ветроэнергетических ресурсов пограничного слоя атмосферы по данным аэрологических наблюдений. — Труды ВНИИГМИ—МЦД, вып. 132, с. 13—19.
- Анапольская Л. Е., Гандин Л. С., 1978. Ветроэнергетические ресурсы и методы их оценки. — Метеорология и гидрология, № 7, с. 11—17.
- Андрианов В. Н. и др., 1960. Ветроэнергетические станции. — Л.: Энергия. — 320 с.
- Атлас ветров России, 2000 / А. Н. Старков, Л. Ландберг, П. Безруких, М. М. Борисенко. — М.: Можайск—Терра. — 560 с.
- Атласы ветрового и солнечного климатов России, 1997 / Под ред. М. М. Борисенко, В. В. Стадник. — СПб, изд. ГГО. — 173 с.
- Борисенко М. М., 2007. Климатические характеристики ветроэнергетических ресурсов на территории Ленинградской области. — В сб.: Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. — Изд. НПК «Атмосфера». Информ. бюлл. № 2(36), с. 119—131.
- Борисенко М. М., 1994. О возможностях крупномасштабного использования энергии ветра на территории России. — Казань, изд. Казанского университета, с. 110—121.



Борисенко М. М., 2006. Практические рекомендации по ветроэнергетике Северо-Запада. — Изд. Академии энергетики, № 4 (12), с. 56—59.

Борисенко М. М., Прахов А. Н., 2006. Исследование особенностей ветрового климата Северо-Западного региона для задач ветроэнергетики. — В сб.: Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. — Изд. НПК «Атмосфера». Информ. бюлл., № 1 (33), с. 87—105.

Борисенко М. М., Кравченко И. К., Прахов А. Н., 2005. Оценка ресурсов энергии ветра и возможности их использования. — В сб.: Климатические ресурсы и методы их использования для прикладных целей. — СПб: Гидрометеиздат, с. 47—60.

Борисенко М. М., Семенова Н. С., Соколова С. Н., 1990. Об особенностях распределения климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов в нижнем 500-метровом слое атмосферы над ЕЧС. — Труды ГГО, вып. 532, с. 82—90.

Брюхань Ф. Ф., Корнюшин О. Г., Пономаренко Л. В., 1987. Ветроэнергетический потенциал нижнего 500-метрового слоя атмосферы над территорией СССР. — Известия АН СССР, сер. геогр., № 3, с. 76—82.

Дробышев А. Д., Курыгина Л. И., 1987. Восстановление статистических характеристик скорости ветра в 500-метровом слое атмосферы. — Труды ЗапСибНИИ, вып. 80, с. 11—21.

Елистратов В. В., Кузнецов М. В., 2004. Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ч. I. Определение ветроэнергетических ресурсов региона СПб. — СПб, Изд. СПбГПУ. — 59 с.

Зеленов В. В., 1982. Проблемы освоения ветровой энергии. Достижения и перспективы, № 27, с. 84—94.

Келлер М. В., 1930. О методах подсчета энергии ветра и ее использовании. — Труды ЦАГИ, вып. 57. — 32 с.

Кобышева Н. В., Степанская Г. А., Чмутова З. Е., 1983. Оценка потенциальных ветроэнергетических ресурсов на территории СССР. — Труды ГГО, вып. 475, с. 7—12.

Красовский Н. В., 1936. Как использовать энергию ветра. — М. — 170 с.

Красовский Н. В., Сабинин Г. Х., 1923. Проблемы использования энергии ветра. — Труды ЦАГИ, вып. 2.

Лятхер В. М., 1987. Ветровые электростанции большой мощности. Обзорная информация, вып. 1. — М.: Изд-во Информэнерго. — 72 с.

Методические указания. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схемы размещения и проектирования ветроэнергетических установок, 1991. РД 52.04.275-89. — М. — 57 с.

Методы разработки ветроэнергетического кадастра, 1963. — М.: Изд-во АН СССР. — 194 с.

Подтягин М. Е., 1938. Кривые распределения ветров. — В сб.: Энергетические ресурсы СССР. Т. II. — М.: Изд-во АН СССР, с. 339—346.

Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов, 1989. — Л.: Гидрометеиздат. — 80 с.

Сидоров В. И., Сидоров В. В., Кузнецов М. В., 1980. Об использовании ветроэнергетических ресурсов. — М.: Энергетика и транспорт, № 3, с. 75—82.

- Симонов Н. В., 1933. Запасы энергии ветра в СССР. — Л. — 64 с.
- Смирнова А. В. и др., 1989. Исследование ветроэнергетических ресурсов Ленинградского региона / Сборник ЛГМЦ, вып. 4(17), с. 3—33.
- Фатеев Е. М., 1957. Методика определения параметров ветроэнергетических ресурсов ветровых установок. — М.: Изд-во АН СССР. — 87 с.
- Харитонов В. П., 1985. Техничко-экономические показатели ВЭУ. — В кн.: Возобновляемые источники энергии. — Ереван.
- Шефтер Я. И., 1975. Использование энергии ветра. — М.: Энергия. — 177 с.

УДК 551.521.31

## **ОЦЕНКА СУММАРНОГО ПРИХОДА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ, ПОСТУПАЮЩЕЙ НА НАКЛОННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ**

*В. В. Стадник<sup>1</sup>, Ю. В. Разгоняев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

<sup>2</sup> Краснодарское отделение НПО «Квант» (НПК «Сатурн»)

*По данным о средних многолетних часовых суммах прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации определены средние суточные и месячные суммы суммарной радиации, поступающей на наклонные поверхности, на территории России. При расчетах использованы данные для более чем 200 станций России и прилегающих территорий стран бывшего СССР. Расчет суммарной радиации производился двумя способами: в предположении изотропного распределения рассеянной и отраженной радиации и с учетом анизотропности распределения рассеянной радиации по модели Дж. Хей.*

*Рассмотрены три поверхности — следящая за Солнцем, наклоненная под оптимальным углом и наклоненная под углом, равным широте места наблюдений. Исследовано соотношение суммарной радиации, поступающей на наклонные и горизонтальную поверхности. Получены обобщенные по широтам (в пределах 40—60 ° с. ш.) коэффициенты пересчета радиации с горизонтальной поверхности на наклонную. Оценен вклад прямой, рассеянной и отраженной радиации в суммарный приход радиации на наклонные поверхности.*

## **ESTIMATION OF THE OVERALL INCOME OF SOLAR RADIATION ON THE INCLINED SURFACES**

*V. V. Stadnik<sup>1</sup>, Yu. V. Razgonyaev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Voeikov Main Geophysical Observatory

<sup>2</sup> Krasnodar Department of ISC «Kvant»

*Basing upon long term hourly totals of solar radiation relating to horizontal surfaces, daily and monthly totals of global radiation on the inclined surfaces have been calculated, the data base embracing over 200*

*station of Russia and surrounding territories of the former USSR. Calculations were performed following 2 algorithms. The first one is based on the assumption of isotropy of the diffuse and reflected radiation, the other — on the assumption of anisotropy of the diffuse radiation in accordance with model of J.E.Hay. The following 3 types of the inclined surfaces were considered: facing the sun, inclined at the optimal angle and at angle that equals to the latitude of the observation site. The work presents ratios of the global radiation incomes on the inclined and horizontal surfaces. The generalized with respect to latitudes (spanning 40—60° N) coefficients of the radiation conversion from the horizontal surface to the inclined one are reported. Contributions of the direct, diffuse and reflected radiation to the overall income upon the inclined surfaces are evaluated.*

Расширение масштабов использования экологически чистых, но относительно дорогих фотоэлектрических станций (ФЭС) в наземных условиях связано с необходимостью их рационального проектирования. При этом требуется выполнение большого объема расчетов для решения системных, параметрических и эксплуатационных задач проектирования на основе справочной информации о климатических характеристиках гелиоэнергетических ресурсов того или иного района.

Результаты наблюдений, проводимых на актинометрических станциях, относятся к горизонтальной поверхности, поэтому для оценки реального поступления солнечной энергии на плоскость фотогенератора необходимо проводить дополнительные расчеты по определению количества солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности. На базе этих расчетов с использованием теплофизических характеристик фотоэлектрического генератора определяется удельная годовая энергосработка. Этот параметр является характеристикой технического потенциала и на начальном этапе разработки характеризует целесообразность и эффективность применения фотоэлектрического способа получения электроэнергии в данной местности. С учетом поправочного коэффициента, определяющего эффективность преобразования постоянного тока в переменный, он может непосредственно использоваться для расчета ФЭС, работающей в составе энергосистемы в режиме взаимодействия ее с распределительной сетью. Существует большое число моделей, позволяющих с удовлетворительной точ-

ностью определять приход солнечной радиации на наклонные поверхности по данным наблюдений (Hay, 1986; Klucher, 1979; Munner, Saluja, 1985; Perez et al., 1986).

В настоящей работе исходной информацией для расчетов стали данные, опубликованные в I части Научно-прикладного справочника по климату СССР (215 актинометрических станций России, стран СНГ и Прибалтики) (НПС, 1990). На сегодняшний день более полной информации, позволяющей выполнять масштабные и достоверные расчеты, к сожалению, не имеется.

Расчет суммарной радиации на наклонные поверхности производился на основе часовых сумм прямой, рассеянной и отраженной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности, двумя способами: в предположении изотропного распределения рассеянной и отраженной радиации и с учетом анизотропности распределения рассеянной радиации. Обсуждаемые ниже результаты рассчитаны по анизотропной модели Дж. Хея (Hay, 1986).

В случае изотропного распределения диффузной радиации — рассеянной ( $D_\alpha$ ) и отраженной ( $R_\alpha$ ) — суммарный солнечный поток радиации ( $Q_\alpha$ ), поступающей на наклонные поверхности, можно описать следующим образом (Кондратьев и др., 1958):

$$Q_\alpha = S_\alpha + D \frac{1 + \cos \alpha}{2} + Q A_k \frac{1 - \cos \alpha}{2}, \quad (1)$$

где  $D$  и  $Q$  — рассеянная и суммарная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность;  $A_k$  — альbedo земной поверхности.

Прямая радиация, поступающая на наклонную поверхность  $S_\alpha$ , определяется через прямую радиацию на перпендикулярную поверхность  $S_\perp$  по формуле

$$S_\alpha = S_\perp [\cos(\varphi - \alpha) \cos \delta \cdot \cos \Omega + \sin(\varphi - \alpha) \sin \delta], \quad (2)$$

где  $\varphi$  — широта места,  $\delta$  — склонение солнца,  $\Omega$  — часовой угол солнца,  $\alpha$  — угол наклона поверхности к горизонту.

В действительности поля рассеянной и отраженной радиации анизотропны, поэтому для точного их определения необходимо учитывать угловое распределение по небосводу интенсивности рассеянной и отраженной радиации (Кондратьев, 1956, 1957, 1958).

Главная особенность углового распределения рассеянной радиации по небосводу заключается в том, что максимум ее наблюдается в околосолнечной зоне, а минимум — в вертикале солнца на угловом расстоянии от светила, равном примерно  $90^\circ$ . В направлении к горизонту интенсивность рассеянной радиации вновь несколько увеличивается. Поток рассеянной радиации от околосолнечной половины неба составляет около 70 % общего потока рассеянной радиации (при коэффициенте прозрачности  $P = 0,67$ ) (Айзенштат, 1961).

Поток отраженной радиации, поступающей на наклонную поверхность, также не является изотропным. Он зависит, в первую очередь, от альбедо подстилающей поверхности и ориентации наклонной поверхности. По данным К. Я. Кондратьева и М. П. Маноловой, наибольшей анизотропностью отражения обладает снежная поверхность (Кондратьев и др., 1957). Однако в случае наклонных поверхностей, ориентированных в сторону солнца, при альбедо менее 0,60 отраженная радиация составляет незначительную часть общего потока радиации. Количественно определить границы допустимости изотропного приближения очень сложно. В связи с этим при расчете суммарной радиации, поступающей на гелиоприемники, ориентированные на юг, долю отраженной радиации во многих случаях можно определять приближенно в предположении изотропности ее распределения, как это предполагается в использованной нами модели.

В этой модели используется предположение о том, что рассеянная радиация, поступающая на наклонную поверхность, состоит из околосолнечной, приходящей с направления на солнце, и однородной диффузной, поступающей от остальной части небосвода. Распределение отраженной радиации принимается изотропным. Суммарный суточный приход радиации в этом случае описывается выражением

$$Q_\alpha = S \int_{t_1}^{t_2} \cos \Theta dt + D_\alpha + QA_k \frac{1 - \cos \alpha}{2}, \quad (3)$$

$$D_\alpha = D \left[ \left( \frac{Q - D}{E_{\text{внеатм}}} \right) \cdot \frac{\cos \Theta}{\cos Z} + \left( 1 - \frac{Q - D}{E_{\text{внеатм}}} \right) \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} \right], \quad (4)$$

где  $E_{\text{внеатм}}$  — внеатмосферная радиация,  $\Theta$  — угол падения прямого солнечного излучения,  $Z$  — зенитный угол солнца.

В данной работе суммарная радиация  $Q_{\alpha}$  рассчитывалась в четырех вариантах — для поверхности, следящей за солнцем, для южной поверхности, ориентируемой каждый месяц на оптимальный угол, и двух неподвижных поверхностей — с углом наклона, оптимальным для года в целом ( $\alpha = OY_{\text{год}}$ ) и равным широте места для пункта наблюдения ( $\alpha = \varphi$ ).

Оптимальный угол наклона поверхности с точностью до  $1^{\circ}$  определялся путем последовательного расчета максимума поступающей на поверхность радиации для каждого месяца и года в целом. Анализ расчетов показал, что во все месяцы года оптимальные углы наклона увеличиваются с юга на север. Наибольшие углы наклона ( $65\text{—}85^{\circ}$ ) характерны для декабря — января, наименьшие ( $5\text{—}20^{\circ}$ ) для июня—июля.

Значения оптимальных углов наклона для трех широт приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Оптимальные углы наклона  $\alpha$  (град.) южных поверхностей, соответствующие максимальному облучению суммарной радиацией**

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
60	84	79	69	47	25	16	20	34	50	66	80	84	43
50	77	71	56	34	18	13	15	28	46	58	69	74	40
40	64	56	40	24	12	5	6	20	39	52	61	64	34

*Европейская часть РФ*

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	II	XI	XII	Год
60		76	75	81	38
50	73	66	63	69	34

*Забайкалье, Дальний Восток*

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	XI	XII	Год
60		83	86	48
50	79	74	79	45

При анализе поступающей на гелиоприемники суммарной солнечной радиации целесообразно рассматривать не абсолютные, а относительные значения суммарной радиации —  $Q_{\alpha}/Q_{\text{гор}}$ , поскольку они обладают значительно большей общностью и зависят, главным образом, от наклона поверхности и высоты солнца. Зависимость от других факторов, в том числе и от облачности, существенно меньше. Относи-

тельные значения наглядно демонстрируют, насколько радиационный режим наклонной поверхности отличается от радиационного режима горизонтальной поверхности.

Результаты сравнения относительных значений  $Q_{\alpha}/Q_{гор}$ , рассчитанных по изотропной и анизотропной моделям, представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Сравнение относительных значений средних суточных сумм суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности ( $Q_{\alpha}/Q_{гор}$ ), рассчитанных по изотропной (1) и анизотропной (2) моделям**

Станция	Поверхность					
	следающая за солнцем		ориентируемая каждый месяц на оптим. угол $\alpha = \phi$		неподвижная с углом наклона $\alpha = \phi$	
	1	2	1	2	1	2
<i>Январь</i>						
Якутск	2,30	2,85	2,21	2,73	2,12	2,58
$\Delta \%$	-24		-24		-22	
Краснодар	1,71	1,90	1,58	1,81	1,74	1,66
$\Delta \%$	-11		-10		-9	
<i>Июль</i>						
Якутск	1,46	1,59	1,05	1,07	0,86	0,87
$\Delta \%$	-9		-2		-1	
Краснодар	1,23	1,31	1,01	1,02	0,90	0,90
$\Delta \%$	-6		-1		0	

Приведенные данные показывают, что использование изотропной модели приводит к занижению суммарной радиации. Наибольшие расхождения характерны для всех поверхностей в зимний период, а летом расхождения меньше и они относятся в основном к поверхности, следающей за солнцем.



Сравнение результатов расчета по анизотропной модели Дж. Хея с имеющимися в нашем распоряжении экспериментальными данными метеопоста Геленджик, предоставленными базовой лабораторией НПК «Сатурн» (Краснодар), показало, что использование данной модели вполне оправдано (табл. 3). Эта модель также успешно используется за рубежом для других территорий (Chowdhury, Rahman, 1988). В дальнейшем при расчете суммарной радиации на наклонные поверхности нами предполагается для сравнения использовать другие модели (Klucher, Saluja, 1979) и уточнять расчеты по мере накопления экспериментальных данных.

Таблица 3

**Сравнение относительных значений суммарной радиации, наблюдаемых и рассчитанных по модели Дж. Хея**

Месяц . . . . .	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Данные наблюдений . . . . .	1,86	1,57	1,32	1,14	1,00	0,95	0,95	1,08	1,28	1,57	1,88	1,82
Результаты расчета . . . . .	1,81	1,51	1,21	1,05	0,95	0,86	0,88	1,00	1,23	1,46	1,72	1,79

Расчет потока суммарной радиации на наклонные поверхности по ее составляющим весьма трудоемок. В целях упрощения расчетов средних суточных или месячных сумм величину относительного потока суммарной радиации, полученную в работе на основе большого объема информации, можно применять как коэффициент пересчета ( $K_{\alpha} = Q_{\alpha}/Q_{гор}$ ) радиации с горизонтальной поверхности на наклонную при средних условиях облачности. Такой подход был предложен ранее З. И. Пивоваровой для пересчета радиации с горизонтальной поверхности на вертикальные (Пивоварова, 1981).

В табл. 4 приведены обобщенные по широтам значения ( $K_{\alpha}$ ) для рассматриваемых поверхностей.

При обобщении данных по широтам не удалось полностью исключить влияние облачности. В связи с этим в зимний период наиболее облачные районы, находящиеся под влиянием теплых атлантических воздушных масс (европейская часть РФ), и малооблачные районы, расположенные в зоне влияния азиатского антициклона (Забайкалье, Дальний Восток), выделены в отдельные группы. Аналогичная особен-

Таблица 4

**Относительные значения средних за месяц суточных сумм суммарной радиации, поступающей на наклонные поверхности, при средних условиях облачности ( $K_{\alpha}$ )**

*Следящая за солнцем поверхность*

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
60	3,12	2,70	2,00	1,64	1,48	1,47	1,48	1,50	1,65	1,83	2,75	3,30
50	2,50	2,07	1,69	1,42	1,38	1,36	1,39	1,45	1,62	1,70	2,04	2,48
40	1,96	1,70	1,48	1,35	1,32	1,30	1,33	1,43	1,56	1,65	1,92	2,02

*Европейская часть РФ*

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	II	XI	XII
60	2,60	2,18	2,09	2,50
50	2,00	1,75	1,71	1,87

*Забайкалье, Дальний Восток*

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	II	X	XI	XII
60	3,75	3,00	2,45	3,84	4,66
50	2,93	2,50	2,05	2,74	3,25

**Поверхность, ориентируемая каждый месяц на оптимальный угол**

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
60	2,95	2,35	1,68	1,26	1,07	1,02	1,04	1,12	1,34	1,60	2,55	3,15
50	2,46	1,85	1,32	1,15	1,04	1,02	1,02	1,09	1,30	1,55	1,96	2,20
40	1,74	1,45	1,19	1,10	1,00	1,00	1,00	1,05	1,20	1,45	1,75	1,82

*Европейская часть РФ*

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	II	XI	XII
60	2,50	1,96	2,00	
50	1,92	1,55	1,56	1,75

*Забайкалье, Дальний Восток*

$\varphi^{\circ}$ с. ш.	I	II	X	XI	XII
60	3,25	2,60	2,10	3,32	4,04
50	2,90	2,10	1,70	2,45	2,90

Продолжение табл. 4

**Неподвижная поверхность с углом наклона, оптимальным для года  
( $\alpha = \text{OY}_{\text{год}}$ )**

$\varphi^\circ$ с. ш.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
60	2,25	2,03	1,57	1,25	1,05	0,95	0,98	1,07	1,33	1,59	2,12	2,68
50	1,88	1,65	1,30	1,13	1,00	0,93	0,98	1,05	1,26	1,46	1,85	1,99
40	1,55	1,40	1,15	1,05	0,96	0,92	0,94	1,00	1,18	1,40	1,55	1,60

Европейская часть РФ

Забайкалье, Дальний Восток

$\varphi^\circ$ с. ш.	I	II	XI	XII
60	1,95	1,69	1,73	2,00
50	1,60	1,45	1,50	1,57

$\varphi^\circ$ с. ш.	I	II	III	X	XI	XII
60	2,68	2,30	1,80	1,95	3,06	3,50
50	2,35	1,93	1,47	1,60	2,15	2,40

**Неподвижная поверхность с углом наклона, равным широте места  
( $\alpha = \varphi$ )**

$\varphi^\circ$ с. ш.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
60	2,78	2,23	1,66	1,24	0,95	0,81	0,85	1,02	1,30	1,68	2,40	2,70
50	2,08	1,74	1,31	1,09	0,95	0,85	0,86	1,01	1,26	1,50	1,93	2,00
40	1,65	1,41	1,19	1,04	0,94	0,86	0,91	1,00	1,20	1,43	1,62	1,69

Европейская часть РФ

Забайкалье, Дальний Восток

$\varphi^\circ$ с. ш.	I	II	XI	XII
60	2,45	1,90	1,98	2,30
50	1,75	1,53	1,54	1,68

$\varphi^\circ$ с. ш.	I	II	III	X	XI	XII
60	3,11	2,57	1,88	2,07	3,07	3,40
50	2,48	2,00	1,48	1,75	2,17	2,53

ность была отмечена при обобщении относительных значений суммарной радиации, поступающей на вертикальные поверхности (Пивоварова, 1981).

Анализ данных, приведенных в табл. 4, показывает, что наибольшее количество суммарной радиации поступает на следящую за солнцем поверхность; на втором месте поверхность, ориентируемая каждый месяц на оптимальный угол. Приход радиации на эти поверхности в течение всего года выше, чем на горизонтальную поверхность. Неподвижные поверхности с углами наклона  $\alpha = \text{ОУ}_{\text{год}}$  и  $\alpha = \varphi$  в целом за год получают суммарной радиации больше, чем горизонтальная поверхность, но в течение года это соотношение не всегда сохраняется. В летние месяцы, когда угол падения солнечных лучей на указанные поверхности мал и солнечные лучи как бы скользят по поверхности, приход суммарной радиации на них меньше, чем на горизонтальную поверхность.

При продвижении с юга на север приход суммарной радиации на наклонную поверхность возрастает по сравнению с ее приходом на горизонтальную поверхность, что находит отражение в увеличении значений  $Q_{\alpha}/Q_{\text{гор}}$ . Это соотношение нарушается, если угол наклона поверхности равен широте места. В высоких широтах поверхности с таким углом наклона получают суммарной радиации меньше, чем в более низких.

В табл. 5 для трех станций, расположенных в различных физико-географических районах, приведено отношение среднего суточного прихода прямой радиации, поступающей на наклонные поверхности, к прямой радиации на горизонтальную поверхность. Из этой таблицы видно, что преимущество наклонной поверхности перед горизонтальной в отношении облученности прямой радиацией выражено более резко, чем в случае суммарной радиации, особенно в зимние месяцы в высоких широтах.

Оценим вклад прямой, рассеянной и отраженной радиации в суммарном приходе и проиллюстрируем его на примере отдельных станций (табл. 6).

В суммарном приходе наибольший вклад прямой радиации отмечается на следящей за солнцем поверхности. Зимой он составляет в среднем 55—60 %, а летом — 65—70 %. На неподвижные поверхности прямой радиации поступает меньше. В летний период ее доля достига-

Таблица 5

**Отношение среднего суточного количества прямой радиации,  
поступающей на наклонные поверхности, к поступающей  
на горизонтальную поверхность**

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
<i>Следящая за солнцем поверхность</i>													
Воейково	8,6	4,1	2,6	2,1	1,8	1,7	1,8	2,0	2,6	3,9	6,0	8,3	2,1
Сад-Город	3,0	2,4	1,9	1,6	1,4	1,4	1,4	1,5	1,8	2,1	2,7	3,3	1,9
Ташкент	2,6	2,3	1,8	1,7	1,5	1,5	1,5	1,6	1,9	2,2	2,8	3,2	1,8
<i>Поверхность, ориентируемая каждый месяц на оптимальный угол</i>													
Воейково	8,1	3,6	2,0	1,4	1,1	1,1	1,1	1,3	1,8	3,2	5,4	7,8	1,4
Сад-город	2,5	1,9	1,4	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,3	1,6	2,3	2,9	1,5
Ташкент	2,2	1,9	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,1	1,4	1,7	2,4	2,8	1,3
<i>Поверхность, ориентируемая на угол оптимальный для года (<math>\alpha = \text{OU}_{\text{год}}</math>)</i>													
Воейково	5,8	2,9	1,8	1,4	1,1	1,1	1,1	1,3	1,8	2,7	4,0	5,4	1,3
Сад-Город	2,4	1,9	1,4	1,1	0,9	0,8	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1	2,6	0,7
Ташкент	1,8	1,7	1,4	1,2	1,0	0,9	0,9	1,1	1,3	1,6	2,0	2,3	0,6
<i>Поверхность, ориентируемая на угол, равный широте места (<math>\alpha = \varphi</math>)</i>													
Воейково	7,4	3,5	2,0	1,4	1,0	0,8	0,9	1,2	1,8	3,2	5,1	7,1	1,3
Сад-Город	2,4	1,9	1,4	1,1	0,9	0,8	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1	2,6	0,6
Ташкент	2,0	1,6	1,4	1,2	0,9	0,8	0,9	1,0	1,3	1,7	2,2	2,5	0,6

ет 50—60 %, в крайних северных районах — только 25 % (здесь основной вклад (75 %) приходится на диффузную радиацию). В целом по территории России доля диффузной радиации в суммарном потоке составляет 40—50 %. При этом на отраженную радиацию при наличии снежного покрова приходится 10—15 %, а в летний период вклад отраженной радиации составляет всего 1—5 %. На Крайнем Севере в весенне-летние месяцы при характерном для этого периода высоком приходе радиации и наличии снежного покрова доля отраженной радиации возрастает до 25—30 %.

Таблица 6

**Вклад (%) в суммарный приход прямой, рассеянной и отраженной радиации, поступающей на наклонную поверхность**

Месяц	Поверхность												
	следящая			ориентируемая каждый месяц на ОУ				неподвижная					
								$\alpha = \text{ОУ}_{\text{год}}$			$\alpha = \varphi$		
	S	D	R	ОУ°	S	D	R	S	D	R	S	D	R
<i>Диксон, <math>\alpha = \text{ОУ}_{\text{год}} = 43^\circ, \alpha = \varphi = 75,5^\circ</math></i>													
I	Полярная ночь												
II	57	33	10	87	55	34	11	52	44	4	55	36	9
III	58	31	10	80	55	32	13	54	41	5	55	33	11
IV	55	34	11	65	48	38	14	49	44	7	46	36	18
V	40	46	13	30	26	70	5	24	66	10	18	53	29
VI	46	48	6	7	28	72	0,2	25	70	5	16	66	18
VII	59	39	3	13	39	61	0,2	38	59	2	32	60	8
VIII	57	40	3	35	41	58	1,3	42	56	2	44	50	6
IX	53	40	8	58	46	50	5	42	55	3	47	45	9
X	53	34	13	82	61	35	14	46	49	5	51	38	12
XI, XII	Полярная ночь												
<i>Якутск, <math>\alpha = \text{ОУ}_{\text{год}} = 46^\circ, \alpha = \varphi = 62^\circ</math></i>													
I	52	36	12	84	51	36	13	47	47	5	50	42	8
II	61	29	10	80	58	30	12	58	37	5	59	33	8
III	64	26	10	73	60	27	13	63	31	6	62	28	10
IV	64	29	7	63	59	34	8	59	35	8	57	32	10
V	66	32	2	27	57	42	1	57	40	3	56	39	5
VI	69	28	2	18	61	39	0,4	60	37	3	58	37	6
VII	70	28	2	18	62	37	0,6	61	36	3	60	35	5
VIII	69	28	2	37	62	36	1,5	62	35	2	62	34	4
IX	68	29	3	54	63	34	3	62	36	2	64	33	3
X	60	32	8	72	57	34	9	55	41	4	56	36	7
XI	58	31	11	84	57	31	12	55	41	5	57	36	7
XII	50	35	15	85	49	36	14	44	50	6	47	44	9

Продолжение табл. 6

Месяц	Поверхность												
	следающая			ориентируемая каждый месяц на ОУ				неподвижная					
								$\alpha = \text{ОУ}_{\text{год}}$			$\alpha = \varphi$		
	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>R</i>	$\text{ОУ}^\circ$	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>R</i>
<i>Краснодар, <math>\alpha = \text{ОУ}_{\text{год}} = 31^\circ, \alpha = \varphi = 45^\circ</math></i>													
I	62	31	6	66	60	34	6	55	44	2	58	39	3
II	58	37	5	55	54	42	4	51	49	1	53	44	3
III	60	37	3	43	55	43	2	53	45	1	55	43	2
IV	60	38	2	28	53	46	1	53	46	1	54	44	2
V	61	37	2	16	55	45	0,4	55	44	1	53	44	3
VI	63	35	2	10	57	43	0,1	56	43	1	54	43	3
VII	65	33	2	11	59	40	0,2	59	40	1	57	40	3
VIII	67	31	2	24	61	38	1	61	38	1	60	37	3
IX	69	29	2	40	64	34	2	64	35	1	64	34	2
X	68	30	2	53	65	33	2	62	37	1	64	34	2
XI	67	30	3	61	63	34	3	58	41	1	61	37	2
XII	58	36	6	62	56	40	4	48	51	1	51	46	3

В годовом ходе максимальный приход суммарной радиации на все рассматриваемые поверхности определяется, главным образом, поступлением прямой солнечной радиации и наблюдается в те месяцы, когда сочетаются оптимальные условия облучения — наибольшие высота солнца и продолжительность дня и наименьшая облачность.

Для примера рассмотрим максимальный суточный приход суммарной радиации на неподвижную поверхность с углом наклона  $\alpha = \varphi$  (рис. 1). Такой угол наклона часто используется в гелиотехнике. На рисунке штриховкой показан месяц максимального прихода суммарной радиации на эту поверхность, изолиниями — значения средних суточных сумм суммарной радиации в этот месяц.

В зависимости от периода максимального прихода суммарной радиации на территории РФ можно выделить семь районов. На большей части европейской территории России максимальный приход радиации на данную поверхность наблюдается в июне. В отдельных районах

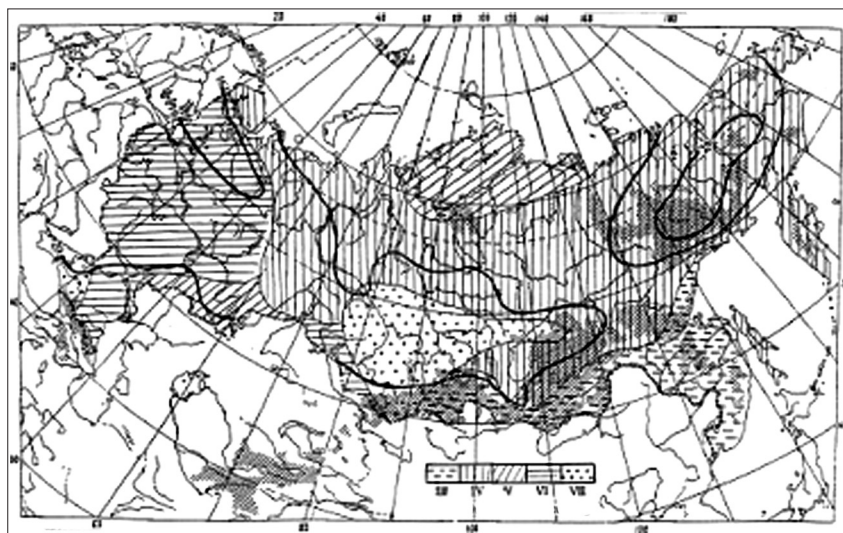


Рис. 1. Средняя суточная сумма суммарной радиации (МДж/м<sup>2</sup>), поступающей на поверхность с углом наклона, равным широте места, в месяц максимального прихода при средней облачности. Южная ориентация.

отмечается смещение максимума в связи с уменьшением облачности: в Заволжье — на май, в Краснодарском крае — на июль. На значительной части азиатской территории России максимум суммарной радиации приходится на апрель. Однако на юге Восточной Сибири и Дальнем Востоке он смещается на март. На полуострове Таймыр максимальный приход суммарной радиации приходится на май, когда при большой продолжительности дня в суммарный приход радиации существенный вклад вносит рассеянная и отраженная радиация в связи с наличием здесь снежного покрова. Из рис. 1 также видно, что возрастание среднего суточного максимума суммарной радиации происходит не только с севера на юг, но и с запада на восток по мере уменьшения влияния Атлантики, особенно в широтном поясе 60—65° с. ш. Наибольшее суточное количество суммарной радиации, поступающей на поверхность с углом наклона  $\alpha = \varphi$ , характерно для северо-востока России, где оно составляет 24—26 МДж/(м<sup>2</sup>·сут).

Как отмечалось выше, для оценки гелиотехнического потенциала того или иного района можно использовать данные расчета годовой



выработки электрической энергии фотоэлектрическим генератором (ФГ) (Стребков, 1993).

Количество электрической энергии, получаемое с помощью фотогенератора, прямо зависит от количества солнечной радиации, поступающей на наклонную поверхность. Таким образом, среднее количество энергии, выработанной за определенный срок, может быть рассчитано по формуле

$$\bar{W}_\phi = \bar{\eta}_\phi \bar{W}_c, \quad (5)$$

где  $\bar{\eta}_\phi$  — средний КПД фотоэлектрического генератора;  $\bar{W}_c$  — среднее количество суммарной солнечной радиации поступающей на поверхность ФГ (кВт·ч/м<sup>2</sup>);

Для корректности оценки необходимо учесть влияние климатических факторов на КПД фотопреобразователей (Кочубей, Разгоняев и др., 1987; Разгоняев, Нагайкин, 1991). Годовую энерговыработку целесообразно определять на основе осредненных месячных значений энергии, которые вычисляются по формуле

$$\bar{W}_\phi = \bar{W}_c \eta_0 [1 + \beta (\bar{T}_0 - \bar{T}_\phi)] \left( 1 + \gamma \ln \frac{\bar{E}}{E_0} \right), \quad (6)$$

где  $\eta_0$  — КПД фотоэлектрического генератора, определенный при стандартных условиях (атмосферная масса  $AM = 1,5$ , интенсивность облучения  $E_0 = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>, температура фотопреобразователей  $T_0 = 40$  °С);  $\beta$  — коэффициент, учитывающий влияние на КПД фотогенератора отклонения рабочей равновесной температуры фотопреобразователей от стандартной;  $\bar{T}_\phi = \bar{T}_в + \alpha \frac{\bar{E}}{E_0}$  — расчетная для данного месяца температура преобразователей;  $\bar{T}_в$  — средняя многолетняя дневная температура воздуха, определяемая по средним часовым значениям от восхода до захода солнца, исключая первый час после восхода и последний час перед заходом;  $\gamma$  — коэффициент, учитывающий влияние на КПД фотогенератора отклонения интенсивности облучения фотогенератора от стандартной;  $\bar{E} = \frac{\bar{W}_c}{t_{\text{дн}} - 2}$  — расчетная для

данного месяца облученность поверхности фотогенератора;  $\overline{W}_c$  — средняя суточная сумма суммарной радиации, поступающая на поверхность фотогенератора с заданным углом наклона;  $t_{\text{дн}}$  — средняя для данного месяца продолжительность дня;  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий нагрев фотопреобразователей солнечной энергией.

Для фотоэлектрических модулей наземного применения, выпускаемых отечественной промышленностью, типовые значения коэффициентов составляют:  $\alpha = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\beta = 0,005 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$ ;  $\gamma = 0,07$ .

Расчеты показали, что при КПД фотогенератора 15 % в южных районах России, особенно в Забайкалье, на юге Хабаровского края и в Приморье, при использовании системы со слежением за солнцем удельная выработка электрической энергии (с 1 м<sup>2</sup> фотогенератора) за год составляет более 300 кВт·ч/м<sup>2</sup>, при неподвижной системе гелиоприемника — более 250 кВт·ч/м<sup>2</sup> (табл. 7). Как было отмечено в работе Стребкова (1993), районы, где удельная годовая выработка электрической энергии составляет не менее 200 кВт·ч/м<sup>2</sup>, можно считать благоприятными для преобразования солнечной энергии в электрическую.

Таблица 7

**Удельное годовое количество электрической энергии (кВт·ч/м<sup>2</sup>),  
вырабатываемое фотоэлектрической батареей  
(КПД фотопреобразователя 15 %)**

Станция	Гелиоприемник		
	следающий за солнцем	ориентируемый ежемесячно на ОУ	неподвижный ( $\alpha = \beta$ )
Советская Гавань	330	266	250
Хабаровск	355	285	269
Новосельское	371	299	288
Сад-Город	340	277	267

В соответствии с комплексным районированием территории России по приоритету солнечного потенциала (Берлянд, Стадник, 2001) южные районы Дальнего Востока занимают первое место. В этих районах целесообразно использовать солнечную радиацию для преобразования как в электрическую, так и в тепловую энергию.

Выполненные в работе расчеты климатических характеристик ге-  
лиоэнергетических ресурсов позволят минимизировать затраты инже-  
нерного труда при решении системных, параметрических и эксплуата-  
ционных задач проектирования фотоэлектрических станций различно-  
го назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айзенштат Б. А., 1961. О поступлении рассеянной радиации на склоны и дно  
горной долины. — Труды ГГО, вып. 107, с. 84—104.
- Берлянд Т. Г., Стадник В. В., 2001. Климатические исследования радиацион-  
ного и теплового баланса Земли. — В сб.: Современные исследования Главной геофизи-  
ческой обсерватории. Юбилейный сборник. Т. 2. — СПб.: Гидрометеоздат,  
с. 273—293.
- Кондратьев К. Я., Манолова М. П., 1956. Приход рассеянной радиации на  
поверхность склона при безоблачном небе и сплошной облачности. — Ученые записки  
ЛГУ, № 210, с. 40—46.
- Кондратьев К. Я., Манолова М. П., 1957. Угловое распределение интенсив-  
ности радиации, отраженной подстилающими естественными поверхностями. — Вест-  
ник ЛГУ, № 10, с. 52—58.
- Кондратьев К. Я., Манолова М. П., 1958. Дневной ход и дневные суммы рас-  
сеянной и суммарной радиации на различно ориентируемых склонах. — Вестник ЛГУ,  
сер. физ. и хим., № 4, с. 5—16.
- Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова М. П., 1978. Радиацион-  
ный режим наклонных поверхностей. — Л.: Гидрометеоздат. — 215 с.
- Кочубей А. А., Разгоняев Ю. В., Несмеев В. П., 1987. Определение вы-  
ходной мощности наземной солнечной батареи. — Гелиотехника, № 3, с. 12—15.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР (НПС), 1990. Серия 3. Ч. 1—7.  
Вып. 1—34. — Л.: Гидрометеоздат.
- Пивоварова З. И., 1973. Характеристика радиационного режима на территории  
СССР применительно к запросам строительства. — Труды ГГО, вып. 321. — 127 с.
- Пивоварова З. И., Стадник В. В., 1981. Климатические характеристики сол-  
нечной радиации как источника энергии. — Л.: Гидрометеоздат. — 292 с.
- Разгоняев Ю. В., Нагайкин А. С., 1991. Результаты натурных испытаний фо-  
тоэлектрической станции микрорайона «Солнечный». — Гелиотехника, № 2, с. 33—36.
- Стребков Д. С., 1993. О развитии солнечной энергетики в России. — Труды  
Международного симпозиума «Автономная энергетика сегодня и завтра», СПб,  
с. 36—39.
- Chowdhury B. H., Rahman S., 1988. Comparative assessment of plane-of-array  
irradiance models. — Solar Energy, 39(5), p. 391—398.
- Hay J. E., 1986. Calculation of solar irradiances for inclined surfaces: validation of  
selected hourly and daily models. — Atmosphere—Ocean, 24, p. 16—41.

Klucher T. M., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. — *Solar Energy*, 23, p. 111—114.

Munner T., Saluja G. S., 1985. A brief review of models for computing solar radiation on inclined surfaces. — *Energy Convers. and Manag.*, 35(4), p. 443—458.

Perez R., Stewart R., Arbogast C., Seals R., Schott J., 1986. An anisotropic hourly diffuse radiation models for slopping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation. — *Solar Energy*, 36(6), p. 481—497.

УДК 551.577.52

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ В ЦЕЛЯХ СОДЕРЖАНИЯ  
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД**

*Л. М. Псаломщикова, И. А. Салль,  
В. В. Стадник, О. В. Трофимова*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова

*Выполнен анализ условий, вызывающих образование различных видов скользкости на отдельных участках федеральных автомобильных трасс «Крым», «Дон», «Холмогоры». Рассчитана повторяемость видов скользкости. Выявлено, что на всех рассматриваемых трассах наиболее часто неблагоприятные условия для автотранспорта создаются при выпадении снега и мокрого снега, поэтому в работе более подробно рассмотрены характеристики снегопадов. Определены продолжительность снегопадов и количество выпадающего снега. Приведена повторяемость снегопадов с различным количеством осадков в зависимости от температуры воздуха. Проанализированы случаи сильных снегопадов и их интенсивность.*

**THE EMPLOYMENT OF METEOROLOGICAL  
DATA FOR THE PURPOSES OF HIGHWAY  
MAINTENANCE IN WINTER**

*L. M. Psalomshicova, I. A. Sall,  
V. V. Stadnik, O. V. Trofimova*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*The present paper deals with the analyses of the factors causing various kind of ice-slipperiness on highway surfaces. The factors are analyzed for some segment of the following motorways: «Crym», «Don», «Kholmogory». It is shown that for all highways under discussion the most frequent unfavourable conditions for motor transport are determined by snow and sleet. Therefore the characteristics of snowfall are discussed in*

*details. The duration and quantity of snowfalls is determined. The repeatability of snowfalls with different precipitation quantity depending on air temperature is presented. The cases of extreme snowfalls and their intensities are analyzed.*

Учету погодно-климатических факторов на стадии проектирования автомобильных дорог уделяется большое внимание, что нашло отражение во многих нормативных документах. Однако в проектно-сметной документации практически отсутствует раздел по их содержанию. Обоснованное решение задач по повышению эффективности работ, связанных с содержанием автомобильных дорог, невозможно без использования различной метеорологической информации — текущей, прогностической и специализированной климатологической.

Наибольшее влияние на работу дорожных служб оказывают погодные условия в зимний период, когда из-за снежных заносов и образования скользкости на поверхности автомобильных дорог резко затрудняется их эксплуатация. Климатические особенности, которые определяют объем затрат на содержание дороги, зависят от местоположения района, по которому она пролегает. Так, например, в районах с частыми переходами температуры воздуха через 0 °С наблюдается повышенная вероятность образования гололедных явлений, а в районах с устойчивыми морозами — снежных заносов (снег здесь более сухой, подвижный и легко переносится ветром).

Кроме метеорологических факторов, состояние дороги зависит от свойств дорожного покрытия, рельефа местности, близости водоемов, расположения трассы по отношению к преобладающему направлению ветра и т. п. Вследствие этого разные участки дороги подвержены обледенению и снежным заносам в разной степени, и водитель не всегда успевает быстро перестроиться на новый режим движения.

Статистика показывает, что от 12 до 15 % общего числа ДТП происходит из-за неблагоприятных дорожных условий, причем около 50 % ДТП приходится на зимний период. Основные причины этого — образование скользкости на дорожном покрытии и уменьшение видимости. По экспертным оценкам зарубежных специалистов, только развитая система погодного мониторинга на дорогах может снизить уровень аварийности на 10—15 % (Самодурова, 2003).

Существующие в России нормативы предусматривают в основном ликвидацию последствий влияния неблагоприятных метеорологических условий, а не их профилактику. В странах с развитой автомобилизацией благодаря переходу на современную систему метеорологического обеспечения появилась возможность предотвращения образования скользкости.

В последнее десятилетие в нашей стране стали появляться автоматические дорожные метеостанции (АДМС), которые обеспечивают дорожные службы текущей информацией не только о погодных условиях (температуре и влажности воздуха, атмосферном давлении, направлении и скорости ветра), но и о состоянии дорожного покрытия. При наличии на АДМС соответствующего программного обеспечения дополнительно рассчитывается тенденция изменения этих характеристик в ближайшие часы. Поскольку в настоящее время автоматических дорожных метеостанций мало, а период наблюдений недостаточен для корректных обобщений и расчета средних многолетних характеристик, службы по содержанию автомобильных дорог пользуются метеорологической информацией Росгидромета.

Для оперативной организации работ по зимнему содержанию автомобильных дорог используются специализированные прогнозы погоды, штормовые предупреждения, текущая метеорологическая информация, а для долгосрочного планирования и расчета затрат на содержание дорог — режимная и специализированная климатологическая информация (Псаломщикова, 2003, 2004).

На государственной наблюдательной сети метеорологические наблюдения ведутся на площадках с естественной подстилающей поверхностью, значительно отличающейся по свойствам от искусственного дорожного полотна. По данным метеостанций состояние дорожного покрытия (степень заснеженности, вид обледенения) можно оценить только косвенно, используя комплекс параметров, наблюдаемых на ближайших к дороге метеорологических площадках.

Ниже приводится краткая характеристика видов скользкости на автодорогах и метеоусловий, при которых они образуются.

*Снежный накат.* Образование снежного наката происходит при положительной температуре воздуха (от 0,3 до 2,0 °С). На дорогах мокрый снег спрессовывается под колесами машин и даже при небольшом понижении температуры (от 0 до –1 °С), замерзает, образуя сплошную

ледяную корку. При дальнейшем понижении температуры ледяное образование может удерживаться в течение длительного времени.

Уплотнение снежных отложений может происходить и при более низкой температуре (от  $-6$  до  $-10$  °C), но только при высокой влажности воздуха (более 90 %) и (или) при сильном ветре.

*Оледенелый снег.* Образуется в результате замерзания талой воды в слое снега во время резких похолоданий после оттепелей. По величине отложения оледенелый мокрый снег часто превосходит гололед, поэтому является очень опасным видом обледенения.

*Рыхлый снег.* Отложение рыхлого снега обычно наблюдается при температуре ниже  $-10$  °C и в интервале температур от  $-6$  до  $-10$  °C, но при влажности менее 90 %.

*Гололед.* В зависимости от плотности гололедные отложения представляют собой прозрачное или матовое отложение льда, образующееся при намерзании на поверхности дороги капель переохлажденного дождя или мороси. Гололедообразование начинается чаще всего при температуре воздуха от 0 до  $-6$  °C, реже при более низких температурах ( $-10$ ... $-12$  °C). При резком потеплении гололед может наблюдаться и при близкой к нулю положительной температуре (от 0 до  $0,5$  °C).

*Гололедица.* Образуется в результате замерзания воды или растворов, имеющих на покрытии дороги, при понижении температуры поверхности дороги ниже 0 °C. Чаще всего гололедица на автомобильных дорогах, образуется при температуре воздуха  $-2$ ... $-6$  °C.

*Зернистая изморозь.* Отличается от гололеда меньшей плотностью и большей шероховатостью. Образование ее связано с замерзанием на сухой поверхности дороги осаждающихся мелких капель тумана без их предварительного растекания. Образование зернистой изморози чаще всего наблюдается при температуре воздуха от  $-1$  до  $-10$  °C. При более низких температурах ( $-12$ ... $-16$  °C) зернистая изморозь обычно наблюдается вместе с кристаллической.

*Кристаллическая изморозь.* Представляет собой пушистый, белый, снегообразный осадок, состоящий из кристаллов льда нежной тонкой структуры. Наблюдается зимой в тихую, малооблачную погоду при высокой влажности и низкой температуре воздуха (от  $-10$  до  $-30$  °C).

*Иней (твердая роса).* Представляет собой белый кристаллический налет. Он образуется на сухой поверхности дороги, имеющей отрица-



тельную температуру, за счет сублимации водяного пара. Необходимым условием для начала сублимации является большая разница между температурой поверхности дороги и температурой воздуха, которая обычно возникает при резком похолодании или при значительном радиационном выхолаживании приземного слоя воздуха. Для дорожных служб иней наиболее опасен весной и осенью, когда вечером температура воздуха положительная, а под утро наблюдаются заморозки.

*«Черный» лед» (твердый ледяной налет).* Является разновидностью изморози. Он представляет собой прозрачный ледяной налет, образующийся при смене погоды, когда происходит резкое ослабление мороза или начинается оттепель. Теплый воздух, соприкасаясь с дорожным покрытием, имеющим значительно более низкую, отрицательную температуру, охлаждается, и при высокой относительной влажности начинается процесс сублимации. Водяной пар при соприкосновении с холодной поверхностью превращается в очень тонкий, почти незаметный слой льда. Если адвекция теплого воздуха сопровождается образованием тумана или густой дымки, наблюдается усиление твердого налета за счет образующейся на его поверхности зернистой изморози.

В данной работе выполнен анализ условий, приводящих к образованию различных видов скользкости на отдельных участках федеральных автомобильных трасс «Дон» (Москва — Ростов-на-Дону), «Крым» (Москва — Белгород) и «Холмогоры» (Москва — Вологда) (рис. 1).

Рассматриваемые участки трасс проходят по пересеченной местности Среднерусской равнины с преобладанием долинно-овражно-балочного рельефа. Выпадение атмосферных осадков в этих районах связано, главным образом, с циклонической деятельностью, а их распределение по территории в значительной степени определяется влиянием подстилающей поверхности: на наветренных возвышенных участках происходит увеличение количества осадков, на подветренных — уменьшение.

В работе использованы ежедневные данные восьмисрочных наблюдений за осадками, атмосферными явлениями, температурой и влажностью воздуха по 20 станциям наблюдательной сети Росгидромета за период с 1984 по 2004 г. Обработка данных включала:

— расчет числа снегопадов, их продолжительности и количества выпавших твердых осадков (снега и мокрого снега);

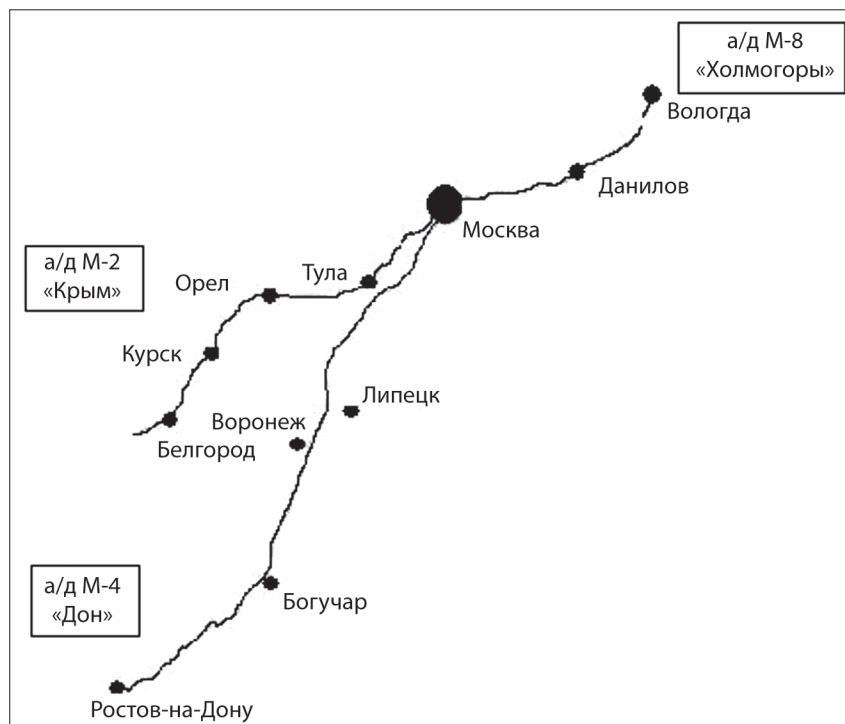


Рис. 1. Карта-схема рассматриваемых участков федеральных автомобильных дорог.

— распределение снегопадов по градациям в зависимости от количества осадков и температуры;

— выборку сильных снегопадов и расчет их интенсивности.

За случай снегопада принималось выпадение снега с перерывами не более двух часов (такой срок устанавливается для ликвидации последствий влияния скользкости на проезжую часть федеральных дорог с высоким уровнем интенсивности движения). При расчете продолжительности снегопадов эти перерывы не учитывались.

Отдельно рассматривались дни без выпадения снега, но с метеоусловиями, способствующими образованию других видов скользкости.

Данные о скользкости необходимы при разработке общей стратегии содержания автомобильных дорог в различных климатических

условиях, а также для определения порядка действий и норм внесения противогололедных материалов (ПГМ) в конкретных ситуациях.

Количество твердых осадков (в данной работе к ним отнесены снег и мокрый снег) зависит от продолжительности и устойчивости холодного периода, которые возрастают в рассматриваемых районах с юго-запада на северо-восток.

В связи с происходящими изменениями климата были уточнены границы холодного периода, определяемые по средним многолетним датам перехода температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  весной и осенью. Сравнение полученных результатов с данными Справочников по климату СССР (Справочник..., 1968; Научно-прикладной справочник..., 1990) показало, что продолжительность холодного периода за последние 20 лет в рассматриваемых районах сократилась везде, за исключением южной части трасс «Дон» и «Крым». Наиболее существенным это сокращение оказалось в Тульской, Орловской и Курской областях. Переход температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  как в сторону положительных значений, так и в сторону отрицательных стал происходить раньше прежних сроков — осенью в среднем на 1—3 дня, а весной на 3—10 дней.

Выборка дней с различными видами скользкости производилась в соответствии с разработанной для этой цели табл. 1, в которой приведены метеорологические условия, способствующие образованию различных видов отложений на автодорогах. При этом принималось условие, что если при каком-либо сочетании метеоусловий могли образоваться два вида отложений или более и их нельзя было разделить, то предпочтение отдавалось более опасному из них или тому, которое при данных условиях наблюдается чаще.

Анализ полученных результатов показал, что общее число дней со всеми видами скользкости уменьшается от 200 дней в Вологде до 85 дней в Ростове-на-Дону. Из рис. 2 следует, что на всех направлениях чаще всего скользкость образуется во время снегопадов (снежный накат, замерзший снег, рыхлый снег). Число дней со снежными отложениями уменьшается при продвижении к югу от 116 дней в районе Вологды до 46 в Ростове-на-Дону.

Второе место по повторяемости занимают гололед и гололедица, являющиеся самыми опасными видами скользкости. Наибольшее число дней в году с гололедными отложениями наблюдается на трассе

Таблица 1

**Виды скользкости на автомобильных дорогах и метеорологические условия, способствующие их образованию**

Температура воздуха, °С	Метеоусловия							
	Снег с дождем, ледяной дождь, морось	Мокрый снег, смешанные осадки	Снег	Во время или после выпадения осадков	Отсутствие тумана и дымки и	Туман	Туман, дымка, высокая влажность	Весной и осенью при отсутствии тумана и дымки
Резкое повышение до 2...-5 °С (не менее чем на 6 °С за ≤ 6 ч)	<i>При выпадении осадков</i>							
Резкое понижение до 0 °С и ниже (не менее, чем на 6 °С за ≤ 6 ч)	<i>При отсутствии осадков</i>							
0...2	Снежный накат			Гололе-дища	«Черный лед» (при влажности воздуха более 97 %)			Иней (при влажности воздуха бо-лее 97 %)

0...-5	Гололед	Снежный накат, оледенелый снег			Зернистая изморозь	
-6...-10	Гололед	Снежный накат (при влажности $\geq 90\%$ )	Рыхлый снег (при влажности $\leq 90\%$ )		Зернистая изморозь	
-11...-17			Рыхлый снег			Кристаллическая изморозь (при тумане или дымке)
Ниже -18			Рыхлый снег			Кристаллическая изморозь (при влажности 91—75 %)

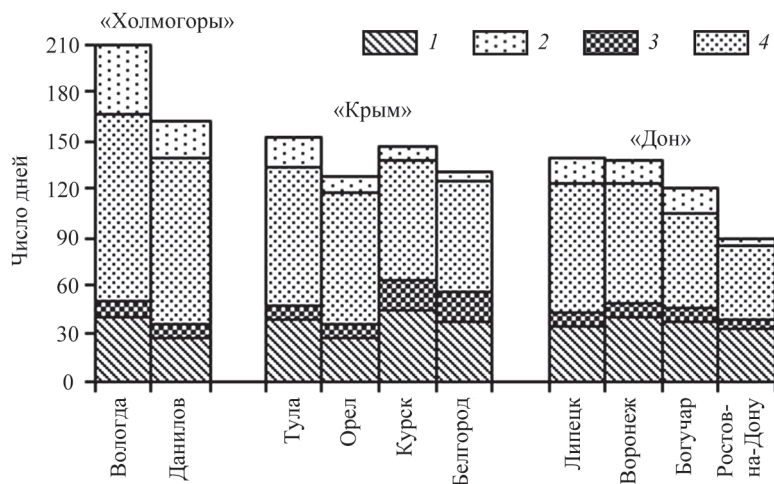


Рис. 2. Число дней с различными видами скользкости.

1 — гололед, гололедица; 2 — иней, кристаллическая изморозь; 3 — «черный лед», зернистая изморозь; 4 — снежный накат, замерзший снег, рыхлый.

«Крым», участок Мценск — Белгород (36—46 дней), и на трассе «Дон», участок Елец—Миллерово (35—38 дней).

Повторяемость отложений в виде «черного льда» и зернистой изморози на рассматриваемых трассах меньше по сравнению с другими видами. «Черный лед» и зернистая изморозь, так же как и гололед, чаще наблюдаются на трассе «Крым» от Курска до Белгорода, а иней и кристаллическая изморозь — на трассе «Холмогоры». Это связано с уменьшением к северо-востоку повторяемости оттепелей и увеличением числа дней с температурой ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при которой возможно образование кристаллической изморози.

Поскольку на всех трассах наиболее часто неблагоприятные для автотранспорта условия создаются при выпадении снега и мокрого снега, в работе более подробно рассмотрены характеристики снегопадов. Общее число снегопадов за сезон и количество выпавшего при этом снега и мокрого снега приведены в табл. 2. Здесь же приведена продолжительность снегопадов. Из таблицы видно, что число снегопадов и их продолжительность уменьшаются с юго-запада на северо-вос-

ток. В отношении количества осадков эта закономерность не всегда соблюдается, поскольку распределение осадков, как уже отмечалось выше, зависит от рельефа местности и местоположения метеостанции.

Таблица 2

**Характеристики снегопадов (снег и мокрый снег) на трех автотрассах**

Станция	Число снегопадов	Количество твердых осадков, мм	Суммарная продолжительность снегопадов, ч
Вологда	147	144	1227
Данилов	119	197	947
Тула	101	147	751
Орел	99	133	619
Курск	96	126	571
Белгород	83	104	461
Липецк	99	113	621
Воронеж	92	128	626
Богучар	72	131	384
Ростов-на Дону	53	86	303

Средняя за сезон продолжительность снегопадов изменяется от 8,3 ч в Вологде до 5,5—5,3 ч в Белгороде и Ростове-на-Дону.

Повторяемость градаций количества выпавших за снегопад осадков представлена на рис. 3. В большинстве случаев (77—85 %) на всех трассах наблюдаются слабые снегопады с количеством осадков до 2 мм. Снегопады с количеством осадков более 10 мм отмечаются редко — не более чем в 2—4 % случаев.

Для того чтобы рассчитать среднее число обработок дорожного полотна за снегопад и нормы ПГМ для отдельных участков и дорог в целом, а также затраты на уборку снега, необходимы данные о числе снегопадов и их продолжительности при различных температурах воздуха.

Как показал анализ, за период с ноября по март наиболее частые и продолжительные снегопады с большим количеством осадков наблюдаются при температуре воздуха от 0 до –5 °С (табл. 3 и рис. 4). Именно

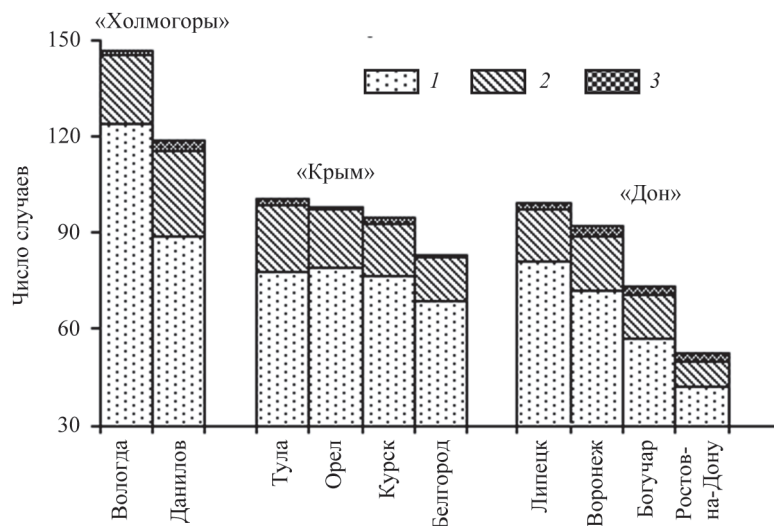


Рис. 3. Повторяемость градаций количества выпавших за снегопад осадков.  
1 — до 3 мм, 2 — от 2 до 10 мм, 3 — более 10 мм.

в этом интервале температур часто происходит образование стекловидного обледенения (снежного наката и замерзшего снега).

При понижении температуры до  $-10...-15$  °С заметно уменьшаются число случаев и продолжительность снегопадов, причем в южных районах (Белгород, Ростов-на-Дону) более существенно (в 4 раза), чем в северных (Вологда) (в 2 раза). Количество осадков при таком понижении температуры уменьшается еще более резко. Уже к югу от Тулы на трассах «Дон» и «Крым» количество осадков уменьшается в 5—7 раз, а на южном участке трассы «Дон» не превышает 2 мм. При температуре воздуха ниже  $-20$  °С снегопады наблюдаются практически только на трассе «Холмогоры».

В оперативной работе дорожных служб крайне важна информация об интенсивности снегопадов (количестве осадков, выпавших за единицу времени). При интенсивности осадков 1—3 мм/ч и более (1 мм слоя воды в среднем равен 1 см свежеснег выпавшего снега) к распределению противогололедных материалов приступают через 15—20 мин после начала снегопада, а при более слабых осадках (0,5—1 мм/ч) — через 30—45 мин.



Таблица 3

**Месячное и сезонное количество (мм) твердых осадков  
(снега и мокрого снега) в зависимости от температуры воздуха**

Месяц	Температура воздуха, °С						Сезон
	0...2	0...-5	-5,1...-10	-10,1...-15	-15,1...-20	<-20	
<i>Вологда</i>							
X	0,4	1,9	0,6				2,9
XI	2,7	12,7	9,3	1,8	0,1		26,6
XII	0,8	11,7	10,3	6,2	3,1	1,0	33,1
I	1,1	11,8	8,5	6,9	3,3	1,9	33,5
II	2,0	10,0	8,6	6,0	1,3	0,3	28,2
III	5,0	8,1	3,2	1,4			17,7
IV	0,6	0,7	0,3				1,6
Сезон	12,6	56,9	40,8	22,3	7,8	3,2	143,6
<i>Ростов-на-Дону</i>							
X							
XI	0,4	0,6	0,6				1,6
XII	2,8	16,1	5,0	1,9			25,8
I	2,8	12,8	3,2	2,0			20,8
II	4,1	12,5	9,7	1,0			27,3
III	1,2	5,2	3,9				10,3
IV							
Сезон	11,3	47,2	22,4	4,9			85,8

Средняя продолжительность наиболее слабых снегопадов ( $\leq 0,1$  мм) по всем рассмотренным участкам дорог составляет 1—2 ч (в Вологде 3 ч), продолжительность умеренных снегопадов (от 4,1 до 6 мм) — 10—16 ч (в Вологде 20 ч).

Снегопады, при которых за период времени не более 12 ч выпадает 7—19 мм осадков, считаются сильными и относятся к *неблагоприятным метеорологическим явлениям*. Снегопады, при которых за такой же период выпадает 20 мм осадков и более, считаются очень сильными и относятся к *опасным явлениям*.

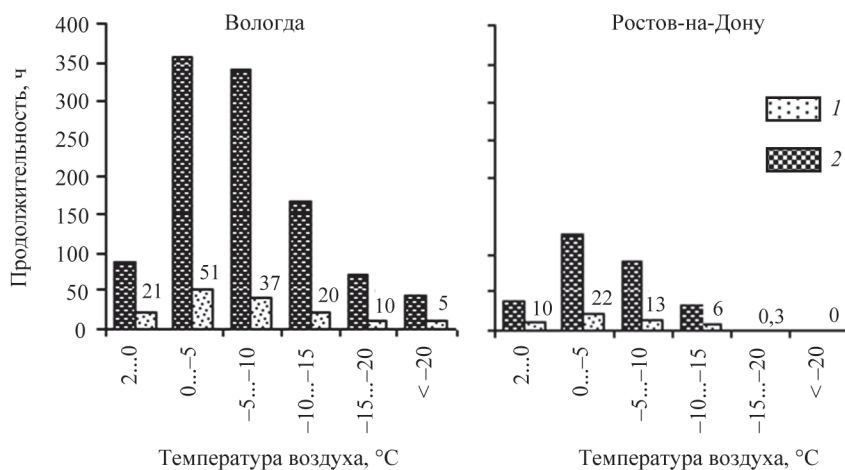


Рис. 4. Число снегопадов (1) и их продолжительность (2) при различной температуре воздуха.

Следует отметить, что при продолжительных снегопадах их интенсивность не остается постоянной. При выборке случаев сильных снегопадов встречались ситуации, когда во время длительного снегопада наблюдалось резкое увеличение его интенсивности. Если продолжительность периода резкого увеличения интенсивности составляла менее 12 ч и при этом выпало большое количество осадков (более 7 мм), то этот период выделялся из общего периода и квалифицировался как случай сильного снегопада.

Из табл. 4 видно, что на трассе «Холмогоры» за 20 лет *опасные* снегопады не наблюдались. На трассе «Крым» (участок Тула—Белгород) они отмечались один раз, а на южном участке трассы «Дон» — 1—3 раза. Максимальное количество осадков, выпавших за один такой снегопад, на всех трассах не превышало 24—31 мм. Повторяемость снегопадов, попадающих в градацию *неблагоприятные явления*, значительно выше и составляет в среднем 2—3 случая в год.

Интенсивность снегопада является очень важной характеристикой для дорожных служб. С ее увеличением резко возрастает опасность ДТП и усложняются работы по поддержанию проезжей части дороги в безопасном для автотранспорта состоянии.

Таблица 4

**Характеристики сильных снегопадов (продолжительность не более 12 ч)**

Станция	Среднее число снегопадов с количеством осадков $\geq 7$ мм	Максимальное количество осадков за снегопад, мм	Общее число опасных снегопадов (с количеством осадков $\geq 20$ мм)	Интенсивность снегопада (наибольшая из средних), мм/ч	Общее число случаев с интенсивностью снегопада	
					$\geq 1$ мм/ч	$\geq 2$ мм/ч
Вологда	1,1	11,2	-	1,9	3	-
Данилов	2,1	16,6	-	2,2	12	1
Тула	2,4	21,8	1	2,3	24	4
Орел	2,4	21,8	1	2,5	29	2
Курск	3,0	16,4	-	3,3	32	3
Белгород	1,7	23,7	1	2,0	12	1
Воронеж	1,7	24,1	1	2,2	14	2
Богучар	3,3	22,3	3	2,7	37	8
Ростов-на-Дону	3,5	30,8	2	3,2	34	8

В связи с особенностями измерения количества осадков, которое производится только два раза в сутки, на метеостанциях интенсивность снегопадов не определяется. Однако можно получить расчетную среднюю интенсивность осадков за снегопад путем деления измеренного количества твердых осадков на их продолжительность.

В данной работе впервые выполнена оценка средней интенсивности сильных и очень сильных снегопадов. Удалось установить, что средняя интенсивность сильных снегопадов на рассмотренных станциях находится в пределах от 0,6 до 3,3 мм/ч. Повторяемость снегопадов с интенсивностью  $\geq 1$  мм/ч невелика: на южных трассах она составляет в среднем 1—2 случая в год, а на трассе «Холмогоры» за 20 лет наблюдались всего три таких снегопада. Более интенсивные снегопады встречались еще реже (см. табл. 4).

В заключение следует отметить, что экстремально сложные метеорологические условия в зимний период чаще всего складываются на

участке трассы «Дон» южнее Воронежа. На этом участке, несмотря на небольшое общее количество снега, выпадающего за сезон, отмечается наибольшая повторяемость сильных и очень сильных снегопадов, а также большое число случаев с гололедом и гололедицей.

На протяжении всей трассы «Крым» очень сильные снегопады отмечаются редко (один раз за рассмотренные 20 лет), но эта трасса в наибольшей степени подвержена гололедным отложениям. Особенно сложным является южный участок трассы Мценск — Белгород.

На трассе «Холмогоры» выпадает самое большое количество твердых осадков, что связано с увеличением продолжительности холодного периода и с уменьшением доли жидких осадков. Снегопады здесь характеризуются большей суммарной продолжительностью, но слабой интенсивностью. В связи с увеличением повторяемости низких температур на этой трассе возрастает повторяемость случаев с инеем и кристаллической изморозью.

Приведенные в работе характеристики различных видов скользкости рассчитаны впервые. Перечень их следует рассматривать как необходимый для разработки общей стратегии содержания автомобильных дорог в зимний период в различных климатических условиях, а также для определения порядка действий и норм внесения противогололедных материалов в конкретных ситуациях. Результаты данной работы были использованы для этой цели Санкт-Петербургским НИИПИ территориального развития и транспортной инфраструктуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Драневич Е. П., 1971. Гололедно-изморозевые явления на северо-западе СССР. — Л.: Гидрометеиздат. — 227 с.
- Зверев А. С., 1968. Синоптическая метеорология. — Л.: Гидрометеиздат. — 770 с.
- Матвеев Л. Т., 1984. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. — 751 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, 1985. Вып 3. Ч. I. — Л.: Гидрометеиздат. — 299 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР (НПС), 1990. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1—6. — Л.: Гидрометеиздат.
- Псаломщикова Л. М., 2003. Дорожная служба погоды при Ленинградском областном центре по гидрометеорологии. Метеоспектр, № 1. — М.: Метеоагентство Росгидромета.

Псаломщикова Л. М., 2004. Специализированное гидрометобеспечение Дорожных служб Санкт-Петербурга и Ленинградской области в ЛЦГМС. Материалы секции «Совершенствование стратегии зимнего содержания автомобильных дорог на основе использования специализированной метеорологической информации». — Материалы VI Московской международной выставки «Доркомэкспо. Дорожно-мостовое хозяйство-2004». Ассоциация «Радор». — М.: ТИМР. — 175 с.

Руководство по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах. Отраслевой дорожный методический документ, 2003. — М.: ГП «Информавтодор».

Руководство по краткосрочным прогнозам погоды, 1986. — Л.: Гидрометеиздат. — 702 с.

Самодурова Т. В., 2003. Метеорологическое обеспечение зимнего содержания автомобильных дорог. Ассоциация «Радор». — М.: ТИМР. — 181 с.

Справочник по климату СССР, 1968. Вып. 3. — Л.: Гидрометеиздат.

УДК.551.594 + 551.594.21

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ (ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ,  
ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ)**

*В. Н. Морозов, Г. Г. Щукин*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

*Дается обзор результатов, полученных в последние годы в области моделирования глобальной электрической цепи (ГЭЦ) и электризации грозных облаков. Рассмотрено влияние молниевых разрядов облако — облако, облако — Земля и генераторов электрического поля, действующих в верхних слоях атмосферы, на изменение электрического поля атмосферы. Проведенные теоретические оценки показывают, что вклад молниевых разрядов облако — Земля в электрическое поле атмосферы меньше 10 %. В то же время вклад в электрическое поле атмосферы генератора в верхних слоях атмосферы в околополярной зоне является весьма существенным и может достигать несколько десятков процентов.*

*Рассмотрены результаты моделирования электризации конвективных облаков с учетом механизма столкновений в двумерном и одномерном случаях. Показана существенная роль электризации, обусловленной столкновением частиц ледяной фазы. Сформулированы уравнения электризации для движения воздуха в конвективном облаке.*

**MODELING OF THE ATMOSPHERIC ELECTRICAL  
PROCESSES**

*V. N. Morozov, G. G. Shchukin*

Voeykov Main Geophysical Observatory

*The results of investigations of modelings global circuit and electrification of thunderclouds are considered. The influences of cloud to cloud discharges, cloud to ground discharges and generators of electrical*

*field, acting in the upper layers of atmosphere on global circuit (global atmospheric potential and the strengths of the electrical field near the Earth) are investigated. The theoretical estimates show that the contribution of cloud-to-ground discharges in electric field of atmosphere is less than 10 %. Contribution of the generator of electrical field, acting in the polar region can reach a few ten of percents.*

*The results of modeling of electrification of convective cloud by collision mechanism are considered in 1D and 2D cases. The important role of electrification by collisions between ice particles is proved. The 3D equations of electrification of convective clouds are formulated.*

## **Введение**

В исследованиях по атмосферному электричеству можно выделить следующие направления.

1. *Моделирование глобальной электрической цепи*, дающее возможность теоретически исследовать процесс возникновения и эволюции электрического поля атмосферы в зависимости от грозовых генераторов (грозовых облаков) и генераторов, действующих в верхних слоях атмосферы (ионосфера и магнитосфера).

2. *Моделирование процессов электризации в облаках различных типов, в том числе и в грозовых*. Исследование электризации в грозовых облаках основано на предположении о важной роли осадкообразующей теории электризации. В то же время в облаках, не дающих осадки, возможно действие других механизмов электризации, в частности диффузионного ионного механизма (Веремей и др., 2006).

3. *Экспериментальные исследования электрических характеристик приземного слоя*, включающие сбор и анализ данных о напряженности электрического поля и электропроводности приземного слоя на станциях атмосферной электрической сети и грозопеленгационные исследования молний от гроз.

Ниже дается обзор первых двух направлений с учетом результатов, полученных в последние годы.

## 1. Моделирование влияния молниевых разрядов грозовых облаков и генераторов, действующих в верхних слоях атмосферы, на глобальную электрическую цепь

Глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) — это система электрических токов, возникающая в атмосфере и пронизывающая магнитосферу, ионосферу и нижнюю атмосферу. Основные положения теории ГЭЦ рассмотрены в ряде обзоров (Атмосфера, 1991; Морозов и др., 2000). Основная проблема, которая возникает при исследовании глобальной электрической цепи, — это проблема ее поддержания, так как вследствие малой, но конечной электропроводности нижней атмосферы электрические поля и токи в атмосфере должны затухать. Поэтому необходимо рассматривать генераторы электрического поля, существующие в атмосфере, которые поддерживают ГЭЦ. Как показывают современные исследования, такими генераторами являются грозовые облака экваториальной зоны земного шара (Roble, Tzur, 1986).

В развитии грозовых облаков (грозовые генераторы) выделяют квазистационарную и молниевую стадии. Первая является стадией установления электрической зарядовой структуры. Вторая характеризуется электрическими разрядами облако — облако (внутриоблачные разряды) и разрядами облако — Земля, характерными для завершающей стадии жизни облака.

Квазистационарная модель ГЭЦ (или модель электрического поля атмосферы) была рассмотрена в работах Haas, Roble (1979), Морозова, Селезневой (1988), Makino, Ogawa (1984). Основное уравнение этой модели глобальной электрической цепи записывается в сферической системе координат с началом в центре Земли:

$$\begin{aligned} \lambda(r) \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \phi^2} \right] + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \\ = - \sum_{s=1}^N \frac{I_{cs}}{r^2} [\delta(r - r_{s0}) - \delta(r - r_{s1})] \delta(\cos \theta - \cos \theta_s) \delta(\phi - \phi_s) = S(r, \theta, \phi), \end{aligned}$$

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad (1)$$

где  $r, \theta, \phi$  — сферические координаты;  $\varphi$  — потенциал электрического поля;  $\vec{E}$  — его напряженность;  $\lambda(r)$  — электрическая проводимость ат-



мосферы;  $I_{cs}$  — электрический ток, даваемый  $s$ -м грозвым генератором;  $N$  — число грозвых генераторов (облаков), действующих в данный момент времени;  $r_{s0}, r_{s1}$  — радиальные расстояния, соответствующие положительному и отрицательному заряду  $s$ -го грозвого облака ( $r_{s0} > r_{s1}$ ),  $\delta(u)$  — функция Дирака.

При выводе уравнения (1) предполагалось, что электрическая проводимость атмосферы  $\lambda(r)$  представляется в виде

$$\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  — электрическая проводимость вблизи земной поверхности;  $R$  — радиус Земли;  $\alpha = (0,2 - 0,3) \text{ км}^{-1}$  — характерный параметр, определяющий изменение электрической проводимости с высотой (Атмосфера, 1991).

Граничные условия для решения уравнения (1) записываются в следующем виде:

$$\varphi|_{r=R} = 0, \quad \varphi|_{r \rightarrow \infty} = \varphi_\infty, \quad (3)$$

где  $\varphi_\infty$  — потенциал ионосферы.

Основным результатом модельных расчетов, проведенных в упомянутых выше работах, явилось получение выражения для глобальной характеристики электрического поля атмосферы — потенциала ионосферы  $\varphi_\infty$ , который для случая электрической проводимости, представленной в виде (2), определяется выражением:

$$\varphi_\infty = \frac{1}{4\pi R^2 \alpha} \sum_{s=1}^N I_{cs} \left( \frac{1}{\lambda_{s1}} - \frac{1}{\lambda_{s0}} \right) = \frac{1}{R^2 \alpha} \sum_{s=1}^N I_{cs} (|Q_{s1}| - Q_{s0}),$$

$$|Q_{s1}| = \frac{I_{cs}}{4\pi \lambda_{s1}}, \quad Q_{s0} = \frac{I_{cs}}{4\pi \lambda_{s0}}. \quad (4)$$

Выражение для потенциала ионосферы  $\varphi_\infty$  следует из условия баланса электрических токов, текущих в областях, где имеются грозвые источники, и электрических токов, текущих в областях, где грозвые облака отсутствуют.

Получим оценки величины  $\varphi_\infty$ , используя выражение (3). Как указывается в работах Muhleisen (1977) и Roble, Tzur (1986), в которых используются экспериментальные данные, для поддержания потенциала

ионосферы  $\varphi_\infty = 250...300$  кВ, который обеспечивает напряженность электрического поля вблизи земной поверхности  $E \approx 100$  В/м, необходимо одновременное действие 2000 гроз по всему земному шару.

Обычно в дипольной модели облака  $Q_{s1} < 0$ ,  $Q_{s0} > 0$ . Поскольку  $\lambda(r_{s0}) > \lambda(r_{s1})$ , то, следовательно,  $|Q_{s1}| > Q_{s0}$  и  $\varphi_\infty > 0$ . При  $|Q_{s1}| - Q_{s0} = 100$  Кл для всех грозовых генераторов  $\alpha = 0,2...0,3$  км<sup>-1</sup>,  $R = 6,4 \cdot 10^6$  м,  $N = 2000$  из (3) получим  $\varphi_\infty = 220...140$  кВ, а при  $|Q_{s1}| - Q_{s0} = 150$  Кл получим  $\varphi_\infty = 330...220$  кВ. При этом если  $\varphi_\infty = 330$  кВ, то  $Q_{s0} = 30$  Кл, а  $Q_{s1} = 180$  Кл. Выбранные разности электрических зарядов грозового облака не противоречат экспериментальным данным и модельным расчетам (Франк-Каменецкий и др., 2006).

Напряженность электрического поля вблизи земной поверхности  $E_z$  описывается соотношением

$$E_z = -\alpha\varphi_\infty. \quad (5)$$

При  $\varphi_\infty \approx 330$  кВ и  $\alpha = 0,3$  км<sup>-1</sup> получим  $E_z \approx 90$  В/м, что близко к наблюдаемым значениям напряженности электрического поля у земной поверхности (Атмосфера, 1991).

Для получения количественных оценок влияния молниевых разрядов на глобальную электрическую цепь необходимо развитие нестационарной модели ГЭЦ. Такая модель была предложена в работе Морозова (2005). Основу этой модели составляет уравнение, аналогичное уравнению (1), но записанное для нестационарного случая:

$$\left( \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} + \lambda(r) \right) \Delta_{r,\theta,\phi} \varphi + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = S(r, \theta, \phi, t). \quad (6)$$

Граничные условия для уравнения (6) аналогичны (3), но к ним добавляется начальное условие

$$\Delta\varphi|_{t=0} = -4\pi\rho(\vec{r}), \quad r > R, \quad (7)$$

где  $\rho(\vec{r})$  — начальное распределение плотности электрического заряда в атмосфере, и потенциал ионосферы  $\varphi_\infty$  предполагается зависящим от времени:  $\varphi_\infty = \varphi_\infty(t)$ .

Потенциал ионосферы  $\varphi_\infty(t)$  определялся после нахождения решения уравнения (6) с граничными условиями (3) и (7) при  $\rho(\vec{r}) = 0$  условием баланса полного тока в нижней атмосфере:

$$\oint_{S_1} \left( \lambda \vec{E} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S} = 0, \quad (8)$$

где  $S_1$  — замкнутая сферическая поверхность, лежащая выше или ниже грозовых генераторов (Морозов, 2005).

В работе Морозова (2005) было получено следующее выражение для потенциала ионосферы  $\varphi_\infty(t)$ :

$$\varphi_\infty(t) = -\frac{1}{R^2 \alpha} \sum_{s=1}^N \left\{ \int_0^t I_{cs}(\tau) E_1 \left( \frac{t-\tau}{\tau_{s0}} \right) d\tau - \int_0^t I_{cs}(\tau) E_1 \left( \frac{t-\tau}{\tau_{s1}} \right) d\tau \right\}, \quad (9)$$

где

$$E_1 \left( \frac{\tau}{\tau(z)} \right) = \int_1^\infty e^{-\frac{\tau}{\tau(z)} u} \frac{du}{u},$$

$$\tau_{s0} = \frac{1}{4\pi\lambda(r_{s0})}, \quad \tau_{s1} = \frac{1}{4\pi\lambda(r_{s1})}.$$

При  $t \gg \tau_{s0}, t \gg \tau_{s1}$  и  $I_{cs}(\tau) = \text{const}$  решение (9) переходит в решение (4).

Условие (9) отражает то обстоятельство, что в областях, где расположены грозовые облака, в верхние слои атмосферы текут токи зарядки, а в областях, где они отсутствуют, текут вниз токи разрядки.

Оценка влияния молниевых разрядов типа облако—облако на  $\varphi_\infty(t)$  и напряженность электрического поля вблизи земной поверхности была проведена в работах Морозова (2005, 2006), Франк-Каменецкого и др. (2006).

Использовались следующие представления для токов, обусловленных внутриоблачными разрядами ( $I_{ccs}$ ) и токов, обусловленных разрядами облако — Земля ( $I_{cgs}$ ):

$$I_{ccs} = -\sum_{n=1}^{N_s} \Delta Q_s \delta(t - nT_s) [\theta(r - r_{s0}) - \theta(r - r_{s1})],$$

$$I_{cgs} = - \sum_{n=1}^{N_s} \Delta Q_s \delta(t - nT_s) [\theta(r - R) - \theta(r - r_{si})], \quad i = 0, 1, \quad (10)$$

где  $\Delta Q_s$  — количество заряда, нейтрализуемого при разряде,  $T_s$  — временной интервал между разрядами в  $s$ -м грозовом генераторе.

Индекс  $i$  во втором представлении для токов при разряде облако — Земля соответствует при  $i = 1$  разряду отрицательного нижнего заряда, а при  $i = 0$  разряду верхнего положительного заряда на Землю.

Для вариаций потенциала, обусловленного этими типами разрядов, были получены следующие выражения:

$$\Delta \varphi_{\infty}^{ccs} = \frac{1}{R^2 \alpha} \sum_{s=1}^N \left[ \sum_{n=1}^{N_s} \Delta Q_s E_1 \left( \frac{t - nT_s}{\tau_{s0}} \right) - \sum_{n=1}^{N_s} \Delta Q_s E_1 \left( \frac{t - nT_s}{\tau_{s1}} \right) \right],$$

$$\Delta \varphi_{\infty}^{cgs} = \frac{1}{R^2 \alpha} \sum_{s=1}^N \sum_{n=1}^{N_s} \Delta Q_s \left[ E_1 \left( \frac{t - nT_s}{\tau_0} \right) - E_1 \left( \frac{t - nT_s}{\tau_{si}} \right) \right], \quad (11)$$

где

$$E_1(x) = \int_1^{\infty} e^{-xu} \frac{du}{u}, \quad \lambda_{si} = \lambda_0 e^{\alpha(r_{si} - R)}, \quad \tau_0 = \frac{1}{4\pi\lambda_0}.$$

Как показали расчеты, внутриоблачные разряды уменьшают потенциал ионосферы, в то же время отрицательные разряды облако — Земля ( $i = 1$ ) увеличивают потенциал ионосферы, а положительные ( $i = 0$ ) уменьшают его. Оценки вариации потенциала ионосферы, проведенные в упомянутых выше работах, показывают, что при  $\Delta Q_s = \Delta Q = 10$  Кл,  $\tau_0 = 600$  с,  $\tau_{si} = 100$  с,  $z_{s1} = 6$  км в предположении, что все  $N = 2000$  гроз испытывают разряд этого типа, вариации потенциала ионосферы  $\Delta \varphi^{cgs}$  составляют 26,4 кВ, уменьшаясь через 10 мин до 3,2—4,8 кВ. При этом вариации напряженности составляют 1 В/м, т. е. порядка 1 % от квазистационарного электрического поля.

В работе Франк-Каменецкого и др. (2006) была исследована связь вариаций электрического поля ГЭЦ с интенсивными облачными разрядами облако — Земля, дающими всплески ОНЧ-излучения (очень низкие частоты, 3—30 кГц). Как указано выше, эти вариации малы. Сравнение данных измерения напряженности поля в приземной атмосфере,

полученных на антарктической станции «Восток» (Франк-Каменецкий и др., 2006), с числом интенсивных молниевых разрядов выявило отрицательную корреляцию между среднечасовыми значениями напряженности электрического поля и числом интенсивных молниевых разрядов. Это объясняется тем, что интенсивные молниевые разряды характеризуют стадию диссипации (распада) грозового облака, на протяжении которой ослабляется действие гроз как генераторов ГЭЦ, что, в свою очередь, уменьшает напряженность атмосферного электрического поля в удаленных от грозовых районов областей.

Другой важной проблемой атмосферного электричества является проблема связи ГЭЦ с крупномасштабными системами продольных магнитосферных токов. Эти токи, текущие в околополярной зоне, создают разность потенциалов электрического поля и генерируют электрические поля в ионосфере, которые проникают в приземную атмосферу, вызывая вариации электрического поля, которые изменяют вариации поля, вызванные грозовыми облаками (унитарная суточная вариация). Эти электрические поля рассчитывались в работе Морозова, Трошичева (2007).

Предполагалось, что продольные токи являются вертикальными на ионосферных высотах в полярной атмосфере, и для описания процессов в полярной области использовалась цилиндрическая система координат  $(r, \phi, z)$ . Основное уравнение, по которому проводились расчеты, имеет вид

$$\sum_p \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \phi^2} \right] = \int_{z_0}^{\infty} \text{div } \vec{j}_{\parallel} dz, \quad (12)$$

где  $\sum_p$  — интегральная проводимость Педерсона,  $\vec{j}_{\parallel}$  — плотность продольного магнитосферного тока,  $z_0$  — вертикальная координата нижней границы ионосферы.

Уравнение (12) решалось с помощью разложения в ряд Фурье для трех моделей распределения  $\vec{j}_{\parallel}$ . В качестве примера рассмотрим модель тока для аврорального овала (полярной шапки):

$$\vec{j}_{\parallel} = -\vec{e}_z \theta (z - z_0) \delta(r - R) \frac{I_{\parallel}}{\pi R}, \quad 0 < \phi < \pi,$$

$$\vec{j}_{\parallel} = \vec{e}_z \theta(z - z_0) \delta(r - R) \frac{I_{\parallel}}{\pi R}, \quad \pi < \phi < 2\pi, \quad (13)$$

где  $I_{\parallel}$  — величина полного продольного тока;  $\vec{e}_z$  — единичный вектор, направленный вдоль оси  $z$ ;  $\theta(z - z_0)$  — функция Хевисайда;  $\delta(r - R)$  — функция Дирака;  $R$  — радиус аврорального овала.

С использованием (13) было получено распределение электрического потенциала в области аврорального овала:

$$\begin{aligned} \varphi(r, \phi) &= \frac{2I_{\parallel}}{\pi^2 \Sigma_p} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{r}{R}\right)^{2k+1} \frac{\sin(2k+1)\phi}{(2k+1)^2}, \quad r < R, \\ \varphi(r, \phi) &= \frac{2I_{\parallel}}{\pi^2 \Sigma_p} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{2k+1} \frac{\sin(2k+1)\phi}{(2k+1)^2}, \quad r > R. \end{aligned} \quad (14)$$

Были также рассчитаны величины  $\varphi(r, \phi)$  для случая неоднородного распределения  $\vec{j}_{\parallel}$  вдоль аврорального овала, а также для распределения  $\vec{j}_{\parallel}$  в области каспа.

В случае неоднородного распределения продольного тока вдоль аврорального овала выражения (13) домножались

на множители  $\frac{\pi}{\chi} e^{-\left(\frac{\phi-\pi}{2}\right)^2/\Delta^2}$  при  $0 < \phi < \pi$  и на  $\frac{\pi}{\chi} e^{-\left(\frac{\phi-3\pi}{2}\right)^2/\Delta^2}$  при

$0 < \phi < 2\pi$ , где  $\chi = 2 \int_0^{\pi/2} e^{-\phi^2/\Delta^2} d\phi$ .

На рис. 1 представлены распределения продольных токов  $I_{\parallel}$  вдоль аврорального овала и дневного каспа. Для расчета  $\varphi(r, \phi)$  выбирались следующие значения параметров: радиус области аврорального овала  $R = 1500$  км; радиусы области дневного каспа  $R_1 = 850$  км и  $R_2 = 1000$  км;  $r = 550$  км;  $I_{\parallel} = 10^6$  А;  $(\Sigma_p)^{-1} = 1$  Ом;  $\Delta = \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{10}, \frac{\pi}{20}$ ;

$\alpha = \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{6}$ . Величина тока  $I_{\parallel}$  связана с напряженностью межпланетного магнитного поля (Frank-Kamenetsky et al., 2001) и может принимать при  $R = R_1$  как положительные, так и отрицательные значения.

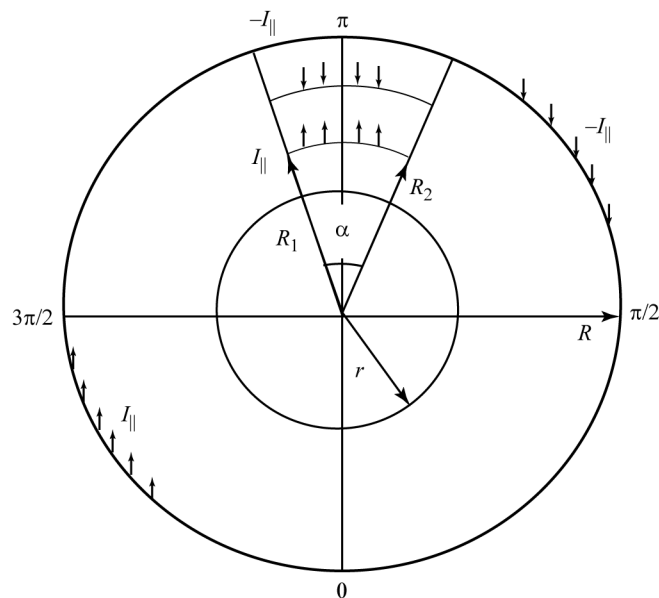


Рис. 1. Распределение продольных токов  $I_{\parallel}$  вдоль областей аврорального овала и дневного каспа.

Результаты расчетов напряженности электрического поля вблизи земной поверхности, которые проводились по формуле  $E_z = -\alpha\phi(r, \phi)$ , представлены на рис. 2. Из рисунка следует, что напряженность электрического поля, создаваемая за счет разности потенциалов электрически поля в области аврорального овала и дневного каспа, может давать существенный вклад в вариации электрического поля атмосферы.

По результатам численных расчетов характерные значения  $\phi(r, \phi)$  составляют  $(7,5...11) \cdot 10^4$  кВ. Это значение должно быть добавлено к потенциалу ионосферы, создаваемому грозами. Как показывают расчеты вариации вертикальной составляющей напряженности электрического поля, ее значение в области аврорального овала составляет 35 В/м (отрицательное в утренние часы и положительное в вечерние часы) и в области дневного каспа 18 В/м.

Аналогичные явления возникают вследствие приливных взаимодействий с атмосферой Земли Солнца и Луны. По результатам расчетов

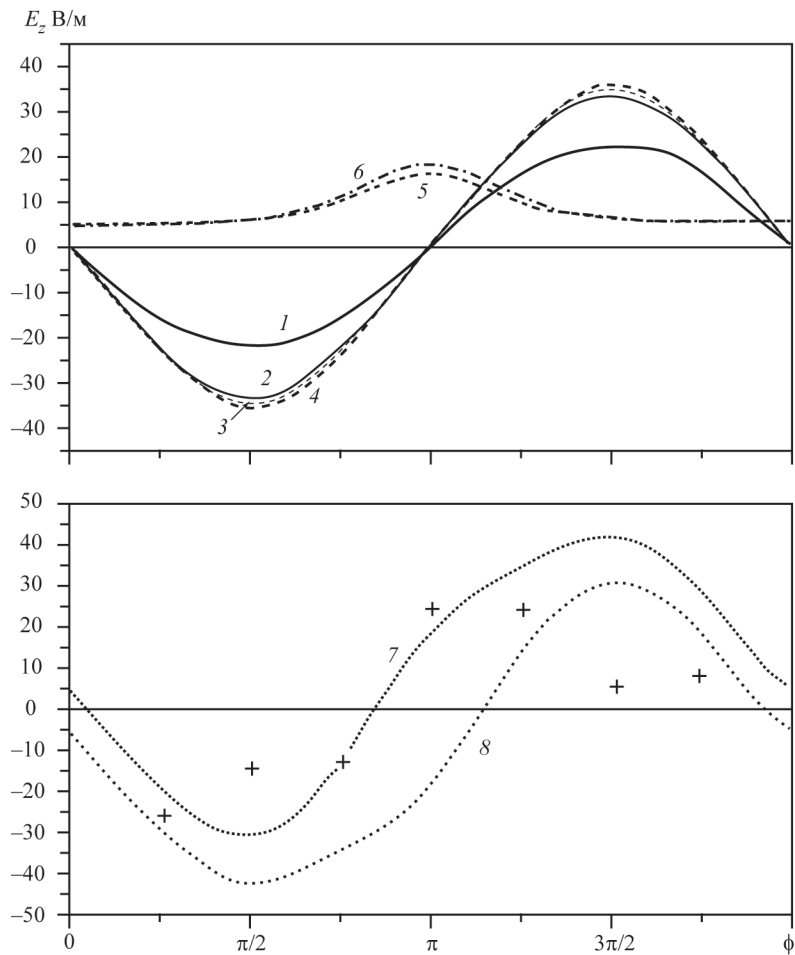


Рис. 2. Напряженность атмосферного электрического поля вблизи земной поверхности, связанная с областью аврорального овала (модели 1 и 2) и областью дневного каспа (модель 3).

1 — модель 1; 2 — модель 2,  $\Delta = \pi / 6$ ; 3 — модель 2,  $\Delta = \pi / 10$ ; 4 — модель 2,  $\Delta = \pi / 20$ ; 5 — модель 3,  $\alpha = \pi / 3$ ; 6 — модель 3,  $\alpha = \pi / 6$ ; 7 — модель 2 + модель 3 для  $I_{\parallel} > 0$  при  $R = R_1$ ; 8 — модель 2 + модель 3 для  $I_{\parallel} < 0$  при  $R = R_1$ . Крестиками указаны значения напряженности электрического поля по данным, полученным на антарктической станции «Восток» (Frank-Kamenetsky et al., 2001).



(Грунская и др., 2003) их величина не очень значительна, а изменения напряженности электрического поля составляют от нескольких процентов (при  $\varphi \approx 25$  кВ вариации  $E_z = 5 \dots 7$  В/м для солнечных приливов).

## 2. Моделирование процессов электризации в осадкообразующих конвективных облаках

В 2007 г. в ГГО были начаты работы по численному моделированию процессов электризации в осадкообразующих конвективных облаках.

Ранее была сформулирована двумерная численная модель электризации конвективных облаков (Пачин, 2002), в которой была рассмотрена электризация на основе контактного механизма при столкновении водяных облачных частиц с ледяными частицами с отскоком на основе детальной микрофизики (термин «детальная микрофизика» означает, что коллектив облачных частиц и частиц осадков описывается с помощью функции распределения по радиусам частиц или их массам). В результате действия этого механизма ледяным частицам передается заряд, равный  $10^{-17}$  Кл, что не приводит к формированию электрических полей, близких к предгрозовым. Поэтому в настоящее время наиболее популярным механизмом электризации среди специалистов, занимающихся моделированием электризации в облачных системах, стала электризация, возникающая при столкновениях с отскоком облачных ледяных частиц (кристаллов) с ледяными частицами осадков (крупа, град), так как этот механизм предполагает, что крупной частице передается заряд, равный  $10^{-13} \dots 10^{-16}$  Кл.

Предварительные оценочные расчеты на основе одномерной стационарной параметрической модели (Морозов, 2006) показали, что этот механизм электризации может генерировать электрические заряды и поля, близкие к грозовым. Для математического описания этого процесса рассматривалась следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz}(w\rho_2) &= -S_1, \quad \frac{d}{dz}[(w - \bar{v}_1)\rho_1] = S_1, \\ \frac{d}{dz}[(w - \bar{v}_1)\bar{N}_1] &= 0, \quad (w - \bar{v}_1)\bar{N}_1 = F_1, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Delta\varphi = -4\pi(\rho_1 + \rho_2), \quad \vec{E} = -\text{grad } \varphi,$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности электрического заряда для частиц облачного льда и крупных ледяных частиц (крупа);  $\bar{N}_1$  — средняя концентрация частиц льда;  $\bar{v}_1$  — средняя скорость седиментации для частиц льда;  $F_1$  — поток крупных частиц, связанный с выпадением осадков;  $w$  — скорость конвективных движений в облаке;  $z$  — вертикальная координата.

Плотность электрического заряда для облачного льда и частиц крупы определяется выражениями:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \int Q_1(D_1, z)N_1(D_1, z)dD_1, \\ \rho_2 &= \int Q_2(D_2, z)N_2(D_2, z)dD_2, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $N_1(D_1, z)$  и  $N_2(D_2, z)$  — функции распределения частиц облачного льда и крупы,  $Q_1(D_1, z)$  и  $Q_2(D_2, z)$  — электрические заряды на частицах льда и крупы.

Функция  $S_1$ , определяющая скорость микроэлектризации облачных ледяных частиц и частиц крупы при их столкновениях с отскоком может быть представлена в следующем виде (Веремей и др., 2007):

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{\pi}{4} \int_{D_1} \int_{D_2} E_{12}(D_1 + D_2)^2 |v_1(D_1) - v_2(D_2)| \times \\ &\times N_1(D_1, z)N_2(D_2, z)\delta q_{12}dD_1dD_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь  $E_{12}$  — эффективность столкновений с отскоком, которая определяется как  $E_{12} = E_{12}^{\text{ст}} E_{12}^{\text{от}}$ , где  $E_{12}^{\text{ст}}$  — коэффициент столкновений,  $E_{12}^{\text{от}}$  — вероятность разделения частиц при столкновениях;  $\delta q_{12}$  — электрический заряд, переносимый от мелких ледяных частиц к крупе при столкновениях с отскоком;  $|v_1(D_1) - v_2(D_2)|$  — разность скоростей седиментации.

Знаки в правых частях первых двух уравнений системы (15) для  $S_1$  выбраны с учетом того, что при столкновениях ледяных частиц с частицами крупы заряд, передаваемый крупе при одном столкновении, отрицателен:  $\delta q_{12} < 0$ .

В соответствии с формулой (17) для расчета  $S_1$  необходимо знать распределения частиц по размерам  $N_1(D_1, z)$ ,  $N_2(D_2, z)$  в зависимости от высоты. В работе Heldson, Farley (1987) эти две группы частиц характеризуются средними диаметрами  $\bar{D}_1$  и  $\bar{D}_2$ . Более сложные аппроксимации, в которых функции распределения облачных ледяных частиц и ледяных осадков задавались в виде гамма- и экспоненциальных распределений, использовались в работе Ziegler et al. (1991).

Используя первый (упрощенный) вариант аппроксимации, получим для  $S_1$  выражение

$$S_1 = \frac{\pi}{4} E_{12} (\bar{D}_1 + \bar{D}_2) |v_1(\bar{D}_1) - v_2(\bar{D}_2)| \bar{N}_1 \bar{N}_2 \delta q_{12}, \quad (18)$$

где  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$  — средние концентрации частиц.

В модели также учитывался рост крупных ледяных частиц за счет их коагуляции с мелкими водяными облачными капельками. Величина  $\delta q_{12}$  задавалась по экспериментальным и теоретическим данным. Были рассчитаны высотные распределения плотностей электрических зарядов  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , которые затем использовались в расчете напряженности электрического поля в электроактивной зоне грозового облака, которую рассматриваемая модель и представляла. Расчеты по оси цилиндрической области показали, что максимальное значение вертикальной составляющей напряженности электрического поля может превышать 10 кВ/см.

Рассмотренная выше модель может быть обобщена на трехмерный нестационарный случай, который описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla(\bar{w}\rho_1) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho_1 \bar{v}_{1z}) - \nabla(k_d \nabla \rho_1) &= -S_1, \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \nabla(\bar{w}\rho_2) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 \bar{v}_{2z}) - \nabla(k_d \nabla \rho_2) &= S_1, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\Delta \phi = -4\pi(\rho_1 + \rho_2), \quad \vec{E} = -\nabla \phi,$$

где  $\vec{w} = (w_x, w_y, w_z)$  — трехмерная скорость конвективного движения в облаке,  $\bar{v}_{1z}$  и  $\bar{v}_{2z}$  — средние скорости седиментации ледяных кристал-

лов и ледяных частиц осадков,  $k_d$  — коэффициент турбулентной диффузии,  $t$  — время.

Функция  $S_1$  представляется также в виде (17). Если в одномерной модели  $N_2(D_2, \vec{r}, t)$  и  $N_1(D_1, \vec{r}, t)$  задавались определенным образом, то в трехмерную нестационарную модель следует ввести уравнения для описания их образования и эволюции. Нахождение функций распределения ледяных частиц и их концентраций является самостоятельной задачей разработки микрофизического блока численной модели.

Эта задача может решаться на основе параметризации процесса образования ледяных частиц (Веремей и др., 2006), а также с использованием детальной микрофизики. Важной задачей является определение величины  $\delta q_{12}$  на основе экспериментальных и теоретических данных. Параметризация величины  $\delta q_{12}$  на основе экспериментальных данных показала, что эта величина зависит от температуры и влажности облачной среды. Значение величины  $\delta q_{12}$  составляет  $10^{-16}$ — $10^{-15}$  Кл.

Таким образом, система уравнений (19), обобщенная на случай трехмерной скорости воздуха в облаке, может стать составной частью трехмерной численной модели осадкообразующего конвективного облака.

## Выводы

1. Исследование влияния молниевых разрядов на глобальную электрическую цепь (ГЭЦ) показывает, что основной вклад в поддержание электрического поля атмосферы вносит квазистационарная стадия развития грозового облака, тогда как вклад отрицательных разрядов облако — Земля не превышает 10 %.

2. Крупномасштабная система магнитосферных продольных токов, действующая в высокоширотной зоне атмосферы, вносит существенный вклад, достигающий нескольких десятков процентов, в вариации атмосферного электрического поля, наблюдаемые на станции «Восток» в Антарктиде (Frank-Kamenetsky et. al., 2001).

3. Моделирование электризации в грозовых облаках показывает существенную роль электризации при столкновениях с отскоком ледяных кристаллов с частицами крупы и града. Обобщение полученных результатов на трехмерный нестационарный случай позволяет вклю-

читать полученные уравнения в блок электризации трехмерной нестационарной численной модели осадкообразующего конвективного облака.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели), 1991. — Л.: Гидрометеорологическое издательство. — 509 с.

Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Морозов В. Н., 2006. О параметризации микрофизических процессов в численных моделях грозовых облаков. — Метеорология и гидрология, № 11, с. 5—18.

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

Грунская Л. В., Морозов В. Н., Ефимов В. А., Гаврилов И. Н., Тарасов А. В., 2003. Лунно-солнечные приливы в электрическом поле атмосферы Земли. — Известия ВУЗов, Физика, № 12, с. 71—77.

Морозов В. Н., Селезнева А. Н., 1988. К обобщению модели глобальной атмосферно-электрической цепи с учетом влияния пограничного слоя атмосферы. — Труды ГГО, вып. 514, с. 60—74.

Морозов В. Н., Шварц Я. М., Щукин Г. Г., 2000. Глобальная электрическая цепь: физико-математическое моделирование и регулярные измерения в нижней атмосфере. — Электрическое взаимодействие ионосферных оболочек. — М., ОИФЗ РАН, с. 55—67.

Морозов В. Н., 2005. Модель нестационарного электрического поля в нижней атмосфере. — Геомагнетизм и аэронавигация, т. 45, № 2, с. 268—278.

Морозов В. Н., 2006. Влияние молниевых грозовых разрядов на параметры глобальной электрической цепи. — Ученые записки РГГМУ, № 3, с. 22—27.

Морозов В. Н., 2006. Расчет электрических зарядов и полей в электроактивной зоне грозового облака. — Труды НИЦ ДЗА (Филиала ГГО), вып. 7 (555), с. 35—50.

Морозов В. Н., Трошичев О. А., 2007. Моделирование вариаций полярного атмосферно-электрического поля, связанного с магнитосферными продольными токами. — Труды VI Российской конференции по атмосферному электричеству. — Нижний Новгород, ИПФ, с. 58а—58б.

Пачин В. А., 2002. Предварительные результаты численных экспериментов по моделированию электризации конвективных облаков. — Труды НИЦ ДЗА (Филиала ГГО), вып. 4 (552), с. 55—65.

Франк-Каменецкий А. В., Трошичев О. А., Морозов В. Н., Барис Г., Корней Р., 2006. Связь приземного электрического поля в высоких широтах с интенсивными молниевыми разрядами облака — Земля, дающими всплески ОНЧ-излучения. — Геомагнетизм и аэронавигация, т. 46, № 3, с. 402—408.

Hays P. B., Roble R. G., 1979. Quasi-static model of global atmospheric electricity. The Lower atmosphere. — J. Geophys. Res., V. 84, No A7, p. 3291—3305.

Makino M., Ogawa T., 1984. Responses of atmospheric electric field and air-earth current to variation of conductivity profiles. — *J. Atmos. Terrest. Physics*, V. 46, No 5, p. 431—435.

Muhleisen R., 1977. The global circuit and its parameters. — In: *Electrical processes in atmosphere*. Darmstade, West. Germany, Steinkopff, p. 467—476.

Heldson J. H., Farley R. D., 1987. A numerical modeling study of involving electrical aspects. — *J. Geophys. Res.*, V. 92, No D5, p. 5661—5675.

Roble R. G., Tzur I., 1986. The global atmospheric-electrical circuit. — In: *The Earth electrical environment*. — Washington, National Academy Press, p. 206—231.

Ziegler C. L., MacGorman D. R., Due J. E., Ray P. S., 1991. A model evolution of noninductive charging in the early electrification of mountain thunderstorm. — *J. Geophys. Res.*, V. 96, No D7, p. 12.833—12.855.

Frank-Kamenetsky A. V., Troshichev O. A., Papitashvili V. O., Burns G. B., 2001. Variations of atmospheric electric field in the near pole region related to interplanetary magnetic field. — *J. Geophys. Res.*, V. 106, No A1, p. 179—190.

УДК 551.501.051

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ РАЗВИТИЯ ОБЛАКОВ И  
ОСАДКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ  
РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ И  
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ**

*Г. Г. Щукин, Д. М. Караваяев*

Главная геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова

*Приводятся некоторые результаты анализа характеристик влажностного содержания атмосферы, полученные с помощью наземных СВЧ-радиометров и радиолокатора в период развития атмосферных фронтов, облаков, осадков. Выполнен поиск новых информативных предикторов развития опасных гидрометеорологических явлений. Предложена простая модель построения регионального СВЧ-радиометрического критерия развития облаков и осадков.*

**DEVELOPMENT OF CLOUD AND PRECIPITATION  
EVOLUTION CRITERION USING GROUND-BASED  
MICROWAVE-RADIOMETRIC DATA AND RADAR  
INFORMATIONS**

*G. G. Shchukin, D. M. Karavaev*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*Some results of atmospheric moisture parameters investigations obtained from microwave radiometers and radar during convection, thunderstorms, rain, front passing are presented. New predictors of dangers based on continuously radiometric water vapor contents measurements are discussed. The simple model of regional microwave-radiometric criterion of clouds and precipitation development is presented.*

В последние 30 лет интенсивное развитие получили дистанционные радиофизические методы исследования параметров атмосферы и облаков, используемые для решения прикладных задач метеорологии,

однако если радиолокационные наблюдения в системе штормооповещения проводятся на национальной метеосети многие годы, то наземные СВЧ-радиометрические измерения до сих пор применяются только в рамках научных исследований. Радиозондирование атмосферы производится в настоящее время два раза в сутки, что не всегда позволяет адекватно описывать изменчивые, особенно в области атмосферных фронтов, параметры влагосодержания атмосферы. СВЧ-радиометрический метод дистанционного зондирования позволяет получать информацию о содержании жидкокапельной влаги (водозапас облаков) и парообразной влаги (влагозапас) атмосферы в реальном времени практически при любой погоде.

Несмотря на то что усвоение информации о влагозапасе в мезомасштабной модели численного прогноза улучшает качество анализа поля влажности и краткосрочного прогноза осадков, оперативное усвоение данных осуществляется только относительно региональной прогностической модели США. Выполненные исследования показывают целесообразность развития наземных мезомасштабных сетевых наблюдений влагозапаса атмосферы для решения задач сверхкраткосрочного прогноза погоды и развития опасных явлений.

Задача работы состоит в изучении пространственно-временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в период опасных гидрометеорологических явлений, связанных с развитием атмосферных фронтов, гроз, осадков, разработке СВЧ-радиометрического критерия для краткосрочного и сверхкраткосрочного прогноза облаков и осадков.

Влагосодержание атмосферы определяется влагозапасом атмосферы

$$Q = \int_0^{\infty} \rho(z) dz$$

и водозапасом облаков

$$W = \int_{z_1}^{z_2} w(z) dz,$$

где  $\rho(z)$  и  $w(z)$  — профили абсолютной влажности воздуха и водности облаков соответственно,  $z_1$  и  $z_2$  — высота верхней и нижней границы



облака. Определение влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков основано на их связи с характеристиками радиотеплового излучения атмосферы: радиояркостной температурой и оптической толщиной. Эти связи вытекают из уравнения переноса радиотеплового излучения.

При безоблачной атмосфере наблюдается корреляционная связь влагозапаса атмосферы с радиояркостной температурой (оптической толщиной) на частотах вблизи линии поглощения водяного пара и в окнах прозрачности атмосферы (Степаненко и др., 1987). Для оценки влагозапаса атмосферы на практике можно использовать уравнение полиномиальной регрессии:

$$Q = d_0(f) + \sum_{j=1}^2 d_j(f)T_{\text{я}}(f)^j,$$

где  $T_{\text{я}}(f)$  — радиояркостная температура при частоте излучения  $f$ ,  $d_j$  — коэффициенты регрессии. Например, на частоте излучения 23,8 ГГц для теплого периода года  $d_0 = -3,93 \text{ кг/м}^2$ ,  $d_1 = 0,653 \text{ кг/(K} \cdot \text{м}^2)$ ,  $d_2 = 0,00136 \text{ кг/(K} \cdot \text{м}^2)$ . При этом коэффициент корреляции составляет 0,99, а фактор, характеризующий относительное уменьшение априорной неопределенности оценки влагозапаса, равен 0,97.

В случае облачной атмосферы измерения характеристик радиотеплового излучения атмосферы производятся как минимум на двух частотах —  $f_1$  и  $f_2$ . Решение задачи определения влагозапаса атмосферы ( $Q$ ) и водозапаса облаков ( $W$ ) при этом приобретает следующий вид:

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

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

где  $\tau_f$  — оптическая толщина атмосферы на частоте  $f$ ;  $a_i, b_i$  — коэффициенты регрессии. Обычно используются среднеклиматические значения, полученные по данным радиозондирования атмосферы и эмпирическим моделям облачности. Теоретическая погрешность определения влагозапаса атмосферы составляет около 10 %, водозапаса облаков — около 30 % (Степаненко и др., 1987).

Для изучения структуры характеристик влагосодержания атмосферы, облаков и осадков в период их развития использовались данные наблюдений с помощью автоматизированных СВЧ-радиометра (частоты 22,2 и 36,5 ГГц) и радиолокатора МРЛ-5, установленных в п. Воей-

ково Ленинградской области. В период экспериментальных исследований (2005—2007 гг.) отработывалась технология непрерывного радиотеплолокационного контроля влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, основанная на методике непрерывных измерений радиояркостной температуры при фиксированных углах места в интервале  $35\text{—}50^\circ$ .

В качестве примера на рис. 1, приведен временной ход влагозапаса атмосферы ( $Q$ ) и водозапаса облаков ( $W$ ), определенных по СВЧ-радиометрическим измерениям в период с 1 по 21 мая 2007 г. в п. Воейково. Из рисунка видно, что влагозапас атмосферы изменялся в широких пределах — от 3,2 до  $35\text{ кг/м}^2$ ; среднее его значение за период с 1 по

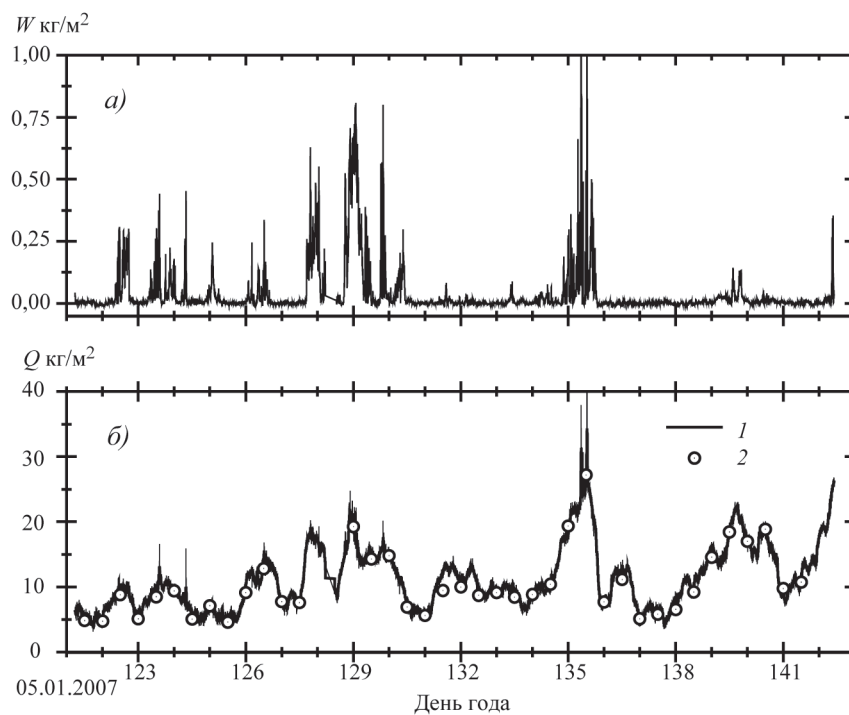


Рис. 1. Ход водозапаса облаков (а) и влагозапаса атмосферы (б) по данным СВЧ-радиометрических измерений (1) и радиозондирования (2) в Воейково в период 1—21 мая 2007 г.

21 мая составило  $11,3 \text{ кг/м}^2$ , а среднее квадратическое отклонение —  $4,77 \text{ кг/м}^2$ . Водозапас облаков, как правило, не превышал  $1,0\text{—}1,2 \text{ кг/м}^2$ . На рисунке также указаны значения влагозапаса атмосферы, полученные в п. Воейково в результате радиозондирования, которые согласуются с данными СВЧ-радиометра (средняя квадратическая ошибка составляет  $1,03 \text{ кг/м}^2$ ).

Сравнение СВЧ-радиометрических и радиозондовых значений влагозапаса атмосферы, выполненное для разных сезонов года, показало, что при вариациях влагозапаса атмосферы в интервале  $2\text{—}45 \text{ кг/м}^2$  и водозапаса облаков в интервале  $0\text{—}1 \text{ кг/м}^2$  средняя квадратическая разность радиометрических и радиозондовых значений влагозапаса в зените составила  $0,98\text{—}1,96 \text{ кг/м}^2$ . Полученные в различные сезоны года СВЧ-радиометрические средние значения водозапаса слоистообразных облаков находятся в удовлетворительном согласии с эмпирическими моделями водности, основанными на данных самолетного и радиозондирования атмосферы в Северо-Западном регионе (Васищева, Щукин, 1977).

На рис. 2 приведен временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков 21—24 июня 2006 г. Из рисунка видно, что в период с 21 по 23 июня по СВЧ-радиометрическим данным влагозапас атмосферы изменялся в интервале  $21\text{—}34 \text{ кг/м}^2$ . 21 июня по данным МРЛ-5 было обнаружено развитие облаков с высотой верхней границы до  $10\text{—}12 \text{ км}$ . Влагозапас атмосферы в этот период (1—2) составил около  $30 \text{ кг/м}^2$ . 23 июня по данным радиолокационного зондирования МРЛ-5 высота верхней границы облаков достигала  $12 \text{ км}$ , при этом максимальные значения логарифма радиолокационной отражаемости превышали 3 ( $\lg Z > 3$ ) (рис. 3). Влагозапас атмосферы в этот период (3 на рис. 2) составил около  $30 \text{ кг/м}^2$ . 24 июня было зарегистрировано уменьшение влагозапаса атмосферы до  $10 \text{ кг/м}^2$ , обусловленное прохождением холодного фронта, и при радиолокационном обзоре в 11 ч 55 мин (4 на рис. 2) облачные образования обнаружены не были.

Как показывает анализ СВЧ-радиометрических данных, быстрые изменения влагозапаса атмосферы являются отличительным признаком временной изменчивости характеристик влагосодержания атмосферы при прохождении атмосферных фронтов. В области холодных фронтов и фронтов окклюзии в теплый период эти изменения могут составлять  $15\text{—}20 \text{ кг/м}^2$ . Максимальная скорость изменения влагозапаса атмосферы

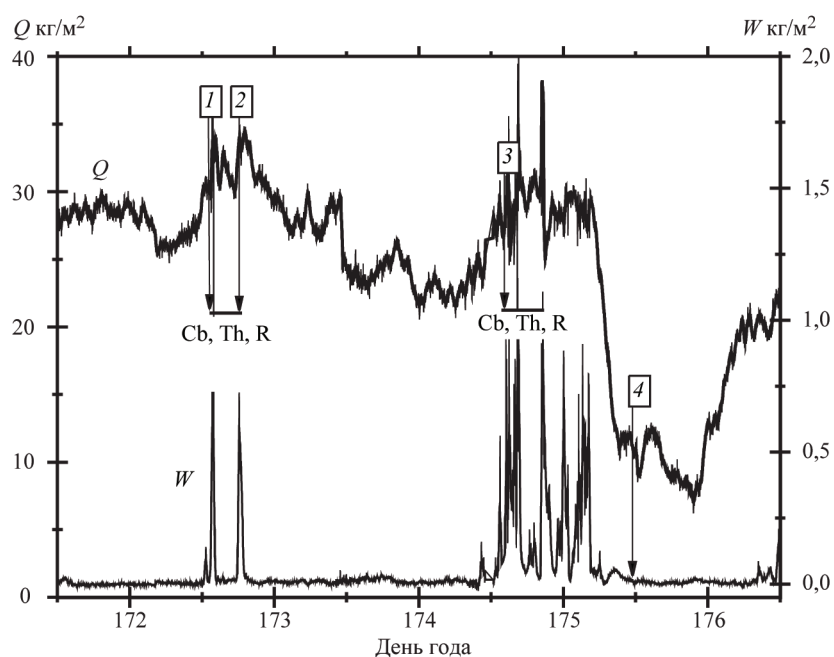


Рис. 2. Ход влагозапаса атмосферы ( $Q$ ) и водозапаса облаков ( $W$ ) по данным СВЧ-радиометрических измерений в п. Воейково 21—24 июня 2006 г.

ры, наблюдаемая при прохождении атмосферных фронтов над океаном, превышала  $0,2 \text{ кг}/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)$ . Особенности корреляционной связи влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различные сезоны года и различных регионах рассмотрены в работе Караваева, Щукина (Karavaev, Shchukin, 1998).

Результаты экспериментальных радиотеплолокационных исследований водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы в период развития мощных конвективных облаков, в том числе грозových, обсуждались ранее в работе Караваева, Щукина (1996). Выполненный статистический анализ данных СВЧ-радиометрических измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и данных радиолокационного зондирования в период развития мощных конвективных и слоистообразных облаков использовался для разработки нового информативного предиктора опасных явлений погоды, связанных с образова-



Рис. 3. Карта радиолокационной отражаемости по данным радиолокационного зондирования в п. Воейково в 12 ч 30 мин 23 июня 2006 г.

ем и эволюцией облаков и осадков. В частности, были отмечены особенности вероятностных распределений влагозапаса атмосферы в периоды развития мощных конвективных (и, в частности, грозовых) облаков, которые отражены в табл. 1.

Таблица 1

**Влагозапас атмосферы в период развития конвективных облаков**

Параметры	Cu hum., Cu med.	Cb, грозы	Все данные
$\bar{Q}$ , кг/м <sup>2</sup>	19,73	29,65	23,78
СКО, кг/м <sup>2</sup>	3,17	2,93	5,97

В таблице приводятся средние значения влагозапаса атмосферы ( $\bar{Q}$ ) и его среднеквадратическое отклонение (СКО) отдельно для трех периодов: а) дни, когда наблюдались облака Cu hum., Cu med.; б) дни, когда наблюдались облака Cb; в) все данные за июль 1993—1995 гг.

Как следует из приведенных данных, в период, когда наблюдалось развитие кучево-дождевых облаков, среднее значение влагозапаса атмосферы составило  $29,65 \text{ кг/м}^2$ . В то же время в период, когда наблюдались лишь облака *Cu hum.*, *Cu med.*, среднее значение влагозапаса атмосферы составило  $19,73 \text{ кг/м}^2$ .

Методика проведения одновременных наблюдений с помощью СВЧ-радиометрического комплекса аппаратуры и радиотехнических средств (РТС), позволяющих обнаруживать грозовые облака (Караваев, Щукин, 2004), состояла в следующем:

в дни, когда в утренние часы отмечались большие значения влагозапаса атмосферы, с помощью МРЛ-1 проводились наблюдения за изменением высоты верхней границы ( $H_{\text{вг}}$ ) облаков и их отражаемости ( $\lg Z$ );

при  $H_{\text{вг}} = 7 \text{ км}$  и  $\lg Z \approx 2$  включались РЛС обнаружения каналов молний и грозопеленгаторы;

обнаружение молниевых разрядов в радиусе  $\sim 100 \text{ км}$  позволяет считать, что в этот день происходило развитие грозовых облаков. В этом эксперименте не рассматривались продолжительность молниевой активности облаков и число разрядов.

На рис. 4 приведен временной ход влагозапаса атмосферы, построенный по данным СВЧ-радиометрических измерений в п. Тургош в период интенсивного развития гроз (июль 1996 г.). Результаты измерений влагозапаса СВЧ-радиометром сравниваются с данными радиозондирования в Вологда и Бологое, расположенных на удалении 290 и 170 км соответственно. На рисунке также отмечены периоды, когда радиолокатор обнаруживал развитие конвективных облаков и электрических разрядов в радиусе 100 км. Выполненные эксперименты показали, что вариации влагозапаса атмосферы в конвективном облаке значительно больше, чем в фоновой атмосфере, а вариации влагозапаса атмосферы в окрестности мощного конвективного (грозового) облака могут составлять 80 %.

Эксперименты, выполненные в п. Тургош Ленинградской области, также показали, что высокое содержание водяного пара в атмосфере в период, предшествующий развитию мощных конвективных облаков, является, по-видимому, необходимым, но недостаточным условием развития мощных конвективных облаков и гроз.

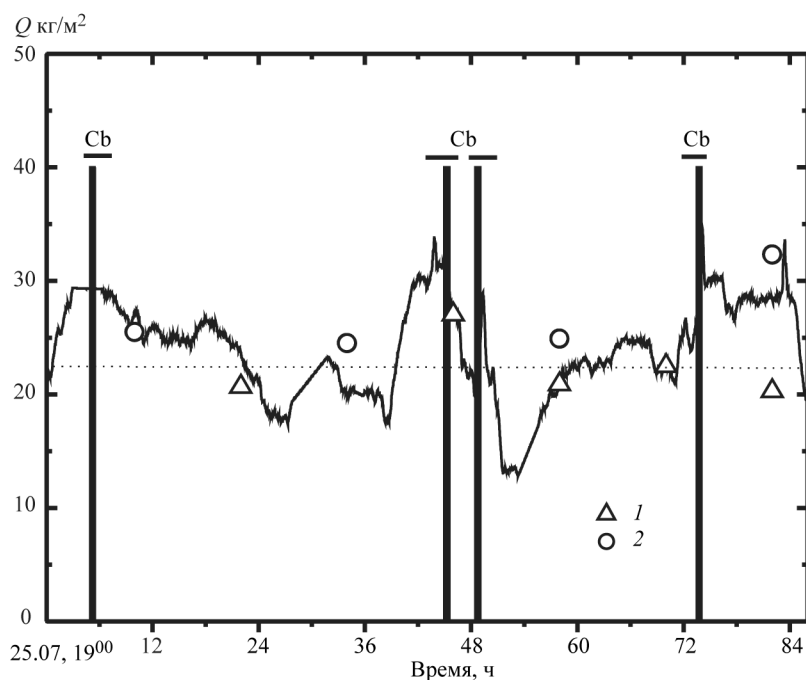


Рис. 4. Ход влагозапаса атмосферы в период развития кучево-дождевых облаков по данным СВЧ-радиометрических измерений 25—29 июля 1996 г. в п. Тургош Ленинградской области.

Для сравнения приведены результаты радиозондирования в Вологде (1) и Бологое (2).

Вертикальной прямой указаны моменты обнаружения грозовой активности.

Рассмотрим пример качественного краткосрочного прогноза развития конвективного (грозового) облака в радиусе  $R$  (км) от пункта СВЧ-радиометрического зондирования. Поставлена следующая задача: по результатам измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков необходимо определить возможность развития в последующие 12 часов опасного явления погоды (ОЯП) (например, мощного конвективного (грозового) облака).

Предположим, что многомерные плотности распределения признаков объекта в классах  $A_1, A_2$  подчиняются нормальному распределению:

$$P_{Ai}(x) = \frac{\exp[-0,5(x - \bar{x}_i)^T M^{-1}(x - \bar{x}_i)]}{(2\pi)^{0,5k} |M|^{0,5}},$$

где  $x$  — вектор признаков объекта размерности  $k$ ;  $\bar{x}_i$  — векторы средних значений признаков в классах  $A_1, A_2$ ;  $M^{-1}$  — матрица, обратная ковариационной матрице признаков  $M$ ;  $|M|$  — определитель ковариационной матрицы признаков.

При построении дискриминантной функции  $Kr$ , разделяющей два класса событий  $A_1 \subset \text{ОЯП}$  и  $A_2 \not\subset \text{ОЯП}$ , часто применяется подход Байеса. Тогда линейная регрессионная модель для прогностической функции  $Kr$  имеет следующий вид:

$$Kr = \ln \frac{P_{A1}(x)}{P_{A2}(x)} = C_0 + \sum_{k=1}^N C_k x_k,$$

где  $P_{A1}$  и  $P_{A2}$  — многомерные плотности вероятности для классов  $A_1$  и  $A_2$  соответственно,  $C_0$  — свободный член,  $C_k$  — коэффициенты регрессии. При  $Kr > 0$  следует ожидать выполнения события, принадлежащего классу  $A_2$ ; в противном случае выполняются условия развития события, принадлежащего классу  $A_1$ .

Предикторы-признаки, определяемые на основе СВЧ-радиометрической информации, включают значения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, а также изменения влагозапаса атмосферы на интервале времени  $T = 3 \dots 12$  ч. Обучающая выборка построена по результатам анализа данных дистанционного зондирования в период развития мощных конвективных (грозовых Сb) облаков в Ленинградской области в теплый период 1993—1996 гг. — всего 23 дня. Построены два критерия: критерий  $Kr1$ , вектор признаков которого включал влагозапас атмосферы, и критерий  $Kr2$ , вектор признаков которого включал как значения влагозапаса атмосферы, так и его изменения за интервал времени  $T$ .

Предварительное тестирование СВЧ-радиометрического критерия для прогноза ОЯП осуществлялось в эксперименте, проведенном в 2006 г. в п. Воейково Ленинградской области. При этом контроль развития процессов образования облаков и осадков осуществлялся по данным радиолокатора МРЛ-5, расположенного в п. Воейково, на основе радиолокационных критериев грозоопасности и данных об осадках. Ра-



диолокационные данные об отражаемости также позволяют оценить высоту верхней и нижней границы облачности, а также площадь радиозахвата.

Индекс ОЯП по данным СВЧ-радиометрических измерений рассчитывался в соответствии с соотношением

$$I_{\text{ОЯП}} = \frac{\exp(Kr)}{1 + \exp(Kr)}$$

Индекс ОЯП принимает значения в интервале 0—1. Если  $I_{\text{ОЯП}} < 0,5$ , то в соответствии с СВЧ-радиометрическим прогнозом развития ОЯП не ожидается. Если  $I_{\text{ОЯП}} > 0,5$ , то ожидается развитие ОЯП.

Пример использования индекса ОЯП приведен на рис. 5. Из рисунка видно, что в конце дня 13 июня СВЧ-радиометрический критерий

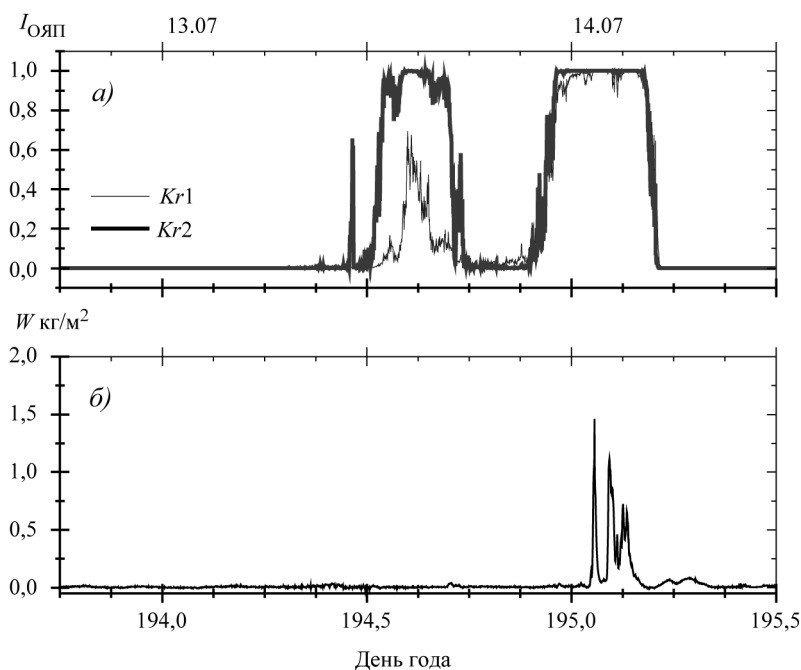


Рис. 5. СВЧ-радиометрический критерий развития ОЯП ( $I_{\text{ОЯП}}$ ) (а) и водозапас облаков ( $W$ ) в п. Воейково (б) 13—14 июля 2006 г.

рий достигает единицы, и это свидетельствует о возможности развития облаков и осадков в последующие часы. Этот прогноз подтвердился: после 0 ч 14 июня по результатам СВЧ-радиометрических измерений были зарегистрированы облака с водозапасом до  $1,5 \text{ кг/м}^2$ , площадь радиоэха которых составила более  $1500 \text{ км}^2$ , а максимальная высота верхней границы достигала 12 км (по данным радиолокационных измерений в 2 ч 19 мин) — рис. 6.

В дальнейшем планируется провести тестирование разработанной методики прогноза развития облаков и образования осадков, оценить заблаговременность и достоверность такого прогноза. Предварительное тестирование предлагаемой схемы прогноза (выполненное на ограниченном статистическом материале) позволяет дать лишь приблизительные оценки характеристик успешности прогноза. Так, например, заблаговременность прогноза при использовании СВЧ-радиометрического критерия при различных метеоусловиях в Ленинградской области может составлять от 2 до 12 ч, причем использование критерия

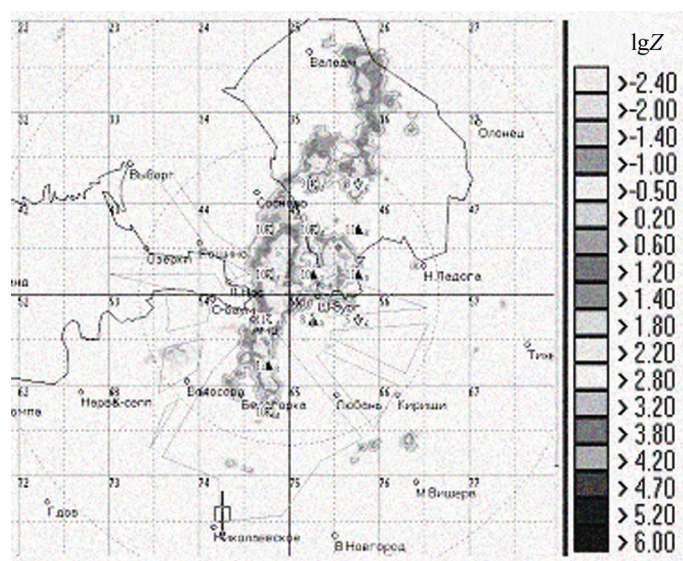


Рис. 6. Карта радиолокационной отражаемости по данным радиолокационного зондирования в 2 ч 19 мин 14 июля 2006 г.

*K<sub>r2</sub>* (вместо *K<sub>r1</sub>*) может повысить заблаговременность прогноза ОЯП в области атмосферных (теплых) фронтов.

### **Заключение**

В работе проанализированы характеристики влагосодержания атмосферы в период развития опасных явлений погоды, связанных с образованием облаков, осадков, гроз. Экспериментальные данные получены с применением наземных активных и пассивных средств и методов дистанционного зондирования атмосферы в период исследований облачной атмосферы в Ленинградской области. Совместные СВЧ-радиометрические и радиолокационные измерения влагосодержания атмосферы и облаков позволяют оперативно получать наиболее полную информацию об изменениях влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, интенсивности осадков, что важно для улучшения сверхкраткосрочного прогноза облаков и осадков. Предложен региональный СВЧ-радиометрический критерий развития облаков и осадков. Для построения критерия применена линейная регрессионная модель, основанная на статистическом анализе СВЧ-радиометрических и радиолокационных данных. Наиболее информативный для построения СВЧ-радиометрического критерия набор предикторов включает уровень влагозапаса атмосферы и его изменение на выбранном интервале времени 6 ч.

Перспективы совершенствования сверхкраткосрочного прогноза связаны с развитием методов усвоения оперативных данных дистанционного зондирования параметров атмосферы в региональных схемах численного прогноза. К числу наиболее важных предикторов, как следует из результатов работы, относятся характеристики влагосодержания атмосферы, которые могут быть получены в режиме реального времени с помощью метеорологической сети наземных СВЧ-радиометров.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Васищева М. А., Шукин Г. Г., 1977. Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы. — Обнинск, с. 94.

Караваев Д. М., Шукин Г. Г., 2004. Применение методов СВЧ-радиометрии для диагноза содержания жидкокапельной влаги в облаках. — Труды ГГО, вып. 5 (533), с. 99—120.

Караваев Д. М., Щукин Г. Г., 1996. Результаты исследования влагозапаса атмосферы в период образования конвективных облаков. — Тезисы докладов XVIII Всероссийской конференции по распространению радиоволн. — М., с. 95—96.

Степаненко В. Д., Гальперин С. М., 1983. Радиотехнические методы исследования гроз. — Л.: Гидрометеиздат. — 204 с.

Степаненко В. Д., 1973. Радиолокация в метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат. — 343 с.

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

Karavayev D. M., Shchukin G. G., 1998. Radiophysical investigations of water vapor and cloud liquid water content. — Fifth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, 15—18 June, Tomsk, SPIE.

УДК 551.521

## НОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СЕТИ

А. П. Бычкова<sup>1</sup>, Ю. И. Казеев<sup>2</sup>, В. И. Кривонощенко<sup>2</sup>,  
Л. В. Луцько<sup>1</sup>, С. А. Соколенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова  
<sup>2</sup> ОАО «Пеленг»

*Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ГГО) и ОАО «Пеленг» Республики Беларусь разработали на базе приборов Янишевского полный комплект актинометрических датчиков (актинометр, пиранометр и балансомер) для наземной наблюдательной сети, а также прибор для автоматизированных измерений продолжительности солнечного сияния. Все приборы успешно прошли испытания в Госстандарте России на утверждение типа. Новые приборы обеспечивают сохранность рядов наблюдений и имеют улучшенные метрологические и эксплуатационные характеристики. Выпуск приборов осуществляет ОАО «Пеленг».*

## THE NEW INSTRUMENTS FOR ACTINOMETRIC OBSERVATIONS

A. P. Bychkova<sup>1</sup>, Y. I. Kazeev<sup>2</sup>, V.I. Krivonoshchenko<sup>2</sup>,  
L. V. Lutsko<sup>1</sup>, S. A. Sokolenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Voeikov Main Geophysical Observatory  
<sup>2</sup> PELENG Company

*Voeikov Main Geophysical Observatory and PELENG Company (Republic of Belarus) have developed the full set of actinometric instruments (actinometer, pyranometer, balansometer) for the ground observation network of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring on the basis of Yanishevsky devices, and also the automated device for measurement of the sunshine duration. All instruments have been successfully tested by the Russian GosStandart for type approval. The new*

*instruments ensure persistence of observational series and have improved metrological and operational characteristics. The instruments are manufactured by PELENG Company.*

На актинометрической сети наземных метеорологических станций Росгидромета проводится пять видов радиационных измерений, для чего необходимы три типа актинометрических датчиков: актинометром измеряют прямую солнечную, пиранометром — суммарную, рассеянную и отраженную радиацию, балансомером — радиационный баланс подстилающей поверхности.

Станции работают по трем различным программам наблюдений:

— программа регистрации обеспечивает непрерывные круглосуточные измерения пяти вышеназванных видов радиации;

— срочные наблюдения предполагают пять видов радиационных измерений шесть раз в сутки (в шесть стандартных актинометрических сроков — 0 ч 30 мин, 6 ч 30 мин, 9 ч 30 мин, 12 ч 30 мин, 15 ч 30 мин, 18 ч 30 мин);

— программа интегрирования включает измерения суточных сумм суммарной радиации при помощи пиранометра и интегрирующего измерительного прибора.

Техническое оснащение для актинометрических станций ранее выпускалось Тбилиским заводом «Гидрометприбор», производившим датчики (актинометр М-3, пиранометр М-80М и балансомер М-10М (Янишевский, 1957)) и измерительные приборы (гальванометры), к которым подключаются актинометрические датчики. После распада СССР выпуск актинометрических приборов был прекращен, однако до настоящего времени практически на всей сети продолжают использоваться эти приборы, неоднократно исчерпавшие свой технический ресурс.

Ввиду сложившейся ситуации Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ГГО) наметила программу модернизации технического оснащения актинометрической сети, реализация которой началась благодаря инициативе ОАО «Пеленг» Республики Беларусь, имеющего высокий технический потенциал и взявшего на себя разработку и освоение производства актинометрических приборов. Работа

выполнялась под научно-техническим руководством ГГО, имеющей большой опыт в области конструирования актинометрических приборов. В дальнейшем программа нашла поддержку Союзного государства России и Беларуси, Росгидромета и Госкомгидромета Республики Беларусь, чья сеть оснащена аналогичными техническими средствами.

Перед разработчиками стояли следующие основные задачи:

— обеспечение сходимости данных с накопленными рядами наблюдений;

— сохранение методики метрологического обеспечения новых датчиков на базе имеющихся на сети эталонных приборов и поверочного оборудования;

— обеспечение возможности устанавливать новые датчики на существующих стационарных стойках, переносных штативах и в поверочном оборудовании.

В процессе разработки конструкции каждого нового прибора изучались особенности существующих аналогов, выполнялись необходимые расчеты, изготавливались и испытывались макеты.

Разработанные ГГО совместно с ОАО «Пеленг» пиранометр «Пеленг СФ-06», балансомер «Пеленг СФ-08» и актинометр «Пеленг СФ-12», а также прибор для автоматизированных измерений продолжительности солнечного сияния «Пеленг ВК-05» обеспечивают решение перечисленных задач, направленных на сохранение однородности рядов наблюдений, а также на облегчение и удешевление внедрения новых приборов на сеть. Взаимозаменяемость конструкций и универсальные присоединительные размеры новых приборов позволяют использовать для их установки на метеорологических площадках имеющееся стационарное вспомогательное оборудование (стойку актинометрическую М-13а, теневую стойку М-41, гелиостат), переносные штативы, а также устанавливать новые приборы в лабораторной поверочной установке ПО-4 и в поверочной трубе ПО-11.

Все разработанные датчики успешно прошли испытания в Госстандарте России на утверждение типа, сертификаты выданы обоим разработчикам: ГУ «ГГО» и ОАО «Пеленг».

Для любых актинометрических датчиков ОАО «Пеленг» разработало электронный измерительный блок с цифровым индикаторным табло, позволяющий не только полностью заменить устаревшие измерительные приборы, но и обеспечить автоматизацию измерений часовых и суточных сумм радиации.

Электронный измерительный блок устанавливают на метеорологической площадке (в ящике для гальванометров) и используют для снятия показаний датчиков при срочных наблюдениях, при поверках приборов и др. Цифровое индикаторное табло, позволяющее получать среднечасовые значения показаний датчиков, а также суточные и месячные суммы радиации, устанавливают в помещении. В основном режиме табло показывает текущие мгновенные значения выходного напряжения датчика, оно также имеет выход на персональный компьютер.

Электронные блоки выпускаются одноканальными (для работы с одним датчиком по сокращенной программе) и трехканальными (для срочных наблюдений и регистрации).

Таким образом, выполнена разработка и освоен выпуск полного комплекта актинометрических приборов для сети, включающего три типа датчиков и измерительные приборы (рис. 1).

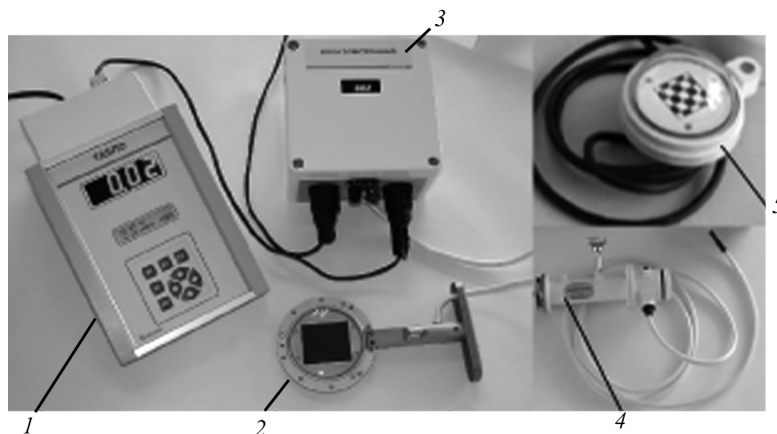


Рис. 1. Внешний вид комплекта актинометрических приборов типа «Пеленг».

1 — электронный измерительный блок, 2 — балансомер, 3 — цифровое индикаторное табло, 4 — актинометр, 5 — пиранометр.

Первой совместной разработкой ГГО и ОАО «Пеленг» стал пиранометр, получивший название «Пеленг СФ-06». При выборе прототипа были рассмотрены существующие зарубежные пиранометры наиболее



известных фирм: Эппли (США) и Kipp&Zonen (Нидерланды). Эти пиранометры имеют черную приемную поверхность, защищенную двойным стеклянным колпаком в целях ограничения воздействия теплового излучения на приемник. У пиранометров подобной конструкции, как правило, массивный корпус и двойной слой воздуха над приемником, что чаще всего приводит к усилению влияния эффекта накопления тепла в приборе, вызывающего смещение места нуля в рабочем режиме.

У пиранометра М-80М, используемого на сети Росгидромета, приемная поверхность черно-белая (активные спаи покрыты черной эмалью, а пассивные — белой). Кроме того, у пиранометра М-80М влияние эффекта накопления тепла незначительно, благодаря тому что активные и пассивные спаи термобатареи располагаются в одной плоскости и имеют одинаковые условия теплоотвода. Специально подобранные спектральные характеристики эмалей обеспечивают чувствительность такой термобатареи только в спектральной области суммарной радиации.

Спектральная чувствительность у пиранометра М-80М и зарубежных аналогов различна, что теоретически не может обеспечить полной сходимости результатов измерений.

Учитывая сказанное, а также поставленные задачи разработки, было решено взять в качестве прототипа пиранометр М-80М и внести в него ряд конструктивных изменений, улучшающих его эксплуатационные качества, но не ухудшающих метрологические характеристики.

В пиранометре «Пеленг СФ-06» повторен чувствительный элемент пиранометра М-80М (Янишевский, 1957), что обеспечивает сохранение перечисленных выше его достоинств.

Недостаточно герметизированный корпус пиранометра М-80М заменен корпусом в герметичном исполнении, что устранило запотевание стеклянного колпака изнутри. Герметизированные пиранометры разрабатывались в ГГО и ранее (Зачек, 1985), однако они были значительно более массивными, чем пиранометр «Пеленг СФ-06».

В июле—августе 2004 г. в ГГО были проведены сравнительные наблюдения по пиранометрам «Пеленг СФ-06» и М-80М (Луцько, 2007). Пиранометр «Пеленг СФ-06» был подключен к электронному измерительному блоку с индикаторным табло, пиранометр М-80М — к компьютеру через логгер.

Результаты измерений среднечасовых значений суммарной радиации сравниваемыми пиранометрами представлены на рис. 2.

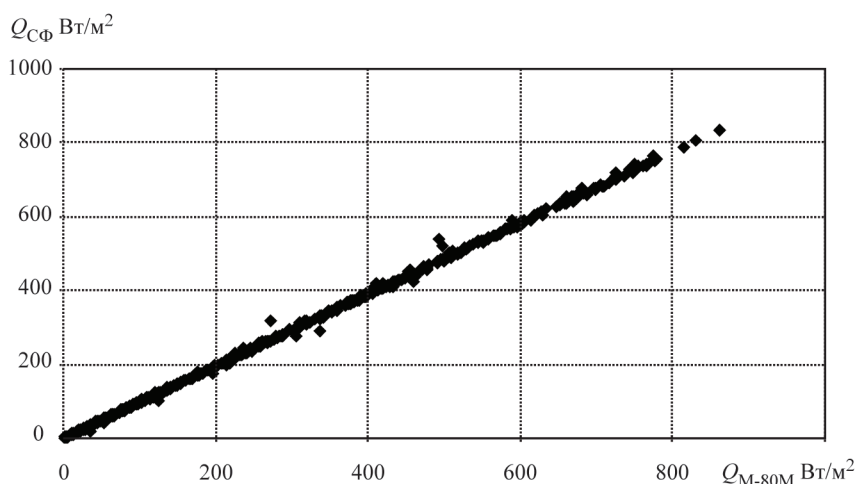


Рис. 2. Связь между среднечасовыми значениями суммарной радиации  $Q$ , измеренными пиранометрами М-80М ( $Q_{M-80M}$ ) и «Пеленг СФ-06» ( $Q_{СФ}$ ).

Связь между результатами измерений линейна при достоверности аппроксимации 1,00. Сходимость данных находится в пределах 3 %, что в три раза ниже погрешности измерений пиранометром М-80М. Такие результаты, собственно говоря, и ожидалось, поскольку конструкция пиранометра «Пеленг СФ-06» максимально приближена к пиранометру М-80М.

Второй совместной разработкой ГГО и ОАО «Пеленг» стал балансомер, получивший название «Пеленг СФ-08».

При выборе конструкции нового балансомера были рассмотрены существующие аналоги. За рубежом одним из наиболее точных считается балансомер типа CNR1 фирмы Kipp&Zonen, который измеряет радиационный баланс как алгебраическую сумму показаний четырех объединенных в одном корпусе датчиков: двух обращенных вверх и вниз пиранометров и двух обращенных вверх и вниз пиргеометров. При этом пиранометры измеряют радиацию в спектральном диапазоне 0,3—2,8 мкм, пиргеометры — в диапазоне 5—42 мкм, а спектральный

участок 2,8—5 мкм оказывается неохваченным. Кроме того, входные окна пиргеометров селективны на краях их спектрального диапазона. При сравнительных наблюдениях балансомера CNR1 с балансомером М-10М, проведенных в ГГО в 2004 г., были получены расхождения, не позволяющие говорить о сходимости рядов наблюдений.

Главными достоинствами балансомера М-10М являются:

непрерывность спектральной чувствительности в области спектра 0,3—40 мкм при незначительной селективности;

практически полное отсутствие влияния эффекта накопления тепла внутри прибора, которое достигается благодаря хорошему тепловому контакту верхней и нижней приемных пластин с общим корпусом и малому расстоянию между ними;

отработанные и внедренные на сеть обоснованные методики измерений и метрологического обеспечения.

С учетом всего вышесказанного было решено при разработке балансомера принять в качестве прототипа балансомер М-10М. При этом была поставлена задача сохранить достоинства прототипа и свести к минимуму его недостатки:

улучшить герметизацию термобатареи;

уменьшить асимметрию чувствительности верхней и нижней сторон балансомера;

снизить зависимость коэффициента преобразования от скорости ветра;

повысить устойчивость приемных поверхностей к воздействию осадков.

В окончательном варианте балансомер «Пеленг СФ-08» (см. рис. 1) сохранил достоинства прототипа. В отличие от балансомера М-10М для обеспечения герметизации термобатарея балансомера «Пеленг СФ-08» полностью заполимеризована. При этом за счет применения новых технологических приемов различия в коэффициентах преобразования двух сторон балансомера были снижены в 1,5—2 раза (по сравнению с балансомером М-10М).

В процессе поиска и выбора способов защиты балансомера от осадков и уменьшения зависимости от скорости ветра были разработаны и изготовлены образцы балансомера с разными формами защитных окон из флюорита, устойчивого к атмосферным воздействиям и имеющего довольно широкую спектральную область пропускания (до

10 мкм). Защитные окна полностью устраняли влияние ветра, однако у такого балансомера появлялись спектральная селективность и смещение нуля в рабочем режиме. В конечном итоге задача была решена благодаря разработанному ОАО «Пеленг» специальному черному покрытию для приемных поверхностей балансомера, устойчивому к воздействию осадков. Это стало очень важным достижением, поскольку необходимость закрывать балансомер от осадков отпала.

Влияние ветра на показания прибора не удалось исключить полностью, но по сравнению с прототипом оно снижено в 1,5 раза благодаря отработанной технологии сборки приемника, обеспечивающей минимально возможную толщину полимера и краски на приемных поверхностях (с увеличением толщины слоя влияние скорости ветра на показания прибора возрастает).

С апреля по июнь 2006 г. на экспериментальной наблюдательной площадке ГГО в пос. Воейково проводились сравнительные наблюдения балансомером «Пеленг СФ-08» и балансомером М-10М.

Оба балансомера были подключены к компьютеру, благодаря чему имелась возможность сравнивать не только осредненные, но и мгновенные значения радиационного баланса, измерявшиеся с дискретностью 10 с. Для анализа результатов измерений выбирались периоды без осадков, поскольку согласно Руководящему документу (РД, 1997) при осадках наблюдения по балансомеру М-10М не проводятся (балансиомер должен закрываться). Скорость ветра в период измерения не превышала 3 м/с, что позволило уменьшить искажения, обусловленные различной чувствительностью балансомеров к ветру.

Поскольку черное покрытие приемных поверхностей балансомеров М-10М и «Пеленг СФ-08» различается и погрешность балансомера «Пеленг СФ-08» в длинноволновой области спектра оценена расчетным методом, то особенно важно было оценить ее на практике путем сравнений балансомеров в ночное время, когда присутствует только длинноволновая радиация и радиационный баланс отрицательный.

На рис. 3 представлены результаты сравнений мгновенных значений баланса 11—13 мая 2006 г., когда требуемые условия наблюдались в течение продолжительных промежутков времени.

Рассеяние точек на рисунке велико, что вызвано кратковременными локальными помехами конвективных потоков и порывов ветра, влияние которых сглаживается при осреднении показаний балансомеров

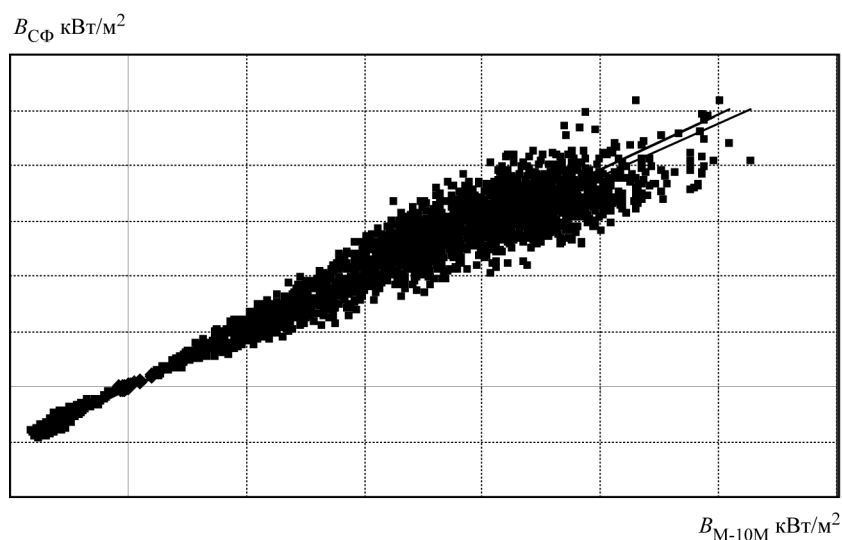


Рис. 3. Мгновенные значения радиационного баланса  $B$ , измеренные балансое-рами М-10М ( $B_{M-10M}$ ) и «Пеленг СФ-08» ( $B_{CF}$ ) с 11 по 13 мая 2006 г.

за отдельные интервалы времени. Поэтому методикой наблюдений (РД, 1997) предусмотрено получение осредненных отсчетов даже при выполнении срочных наблюдений. Несмотря на разброс точек, на рис. 3 отчетливо выражена линейная связь между показаниями сравниваемых балансоемеров как при положительных, так и при отрицательных значениях баланса — аппроксимационные прямые для каждого из рассмотренных дней проходят через начало координат и близки друг к другу. Неожиданно высокой при таком большом рассеянии точек оказалась достоверность аппроксимации  $R^2$ , составляющая в отдельные дни от 0,96 до 0,98. Примечательно, что все три аппроксимационные прямые проходят практически через нуль: отклонения от нуля менее 0,01 кВт/м<sup>2</sup>, т.е. ниже дискретности измеряемых на сети значений актинометрических величин, округляемых до 0,01 кВт/м<sup>2</sup>.

При осреднении измеряемых значений за отдельные интервалы времени рассеяние точек сглаживается, что видно из рис. 4, на котором показан пример хода среднечасовых значений баланса. Полученные по

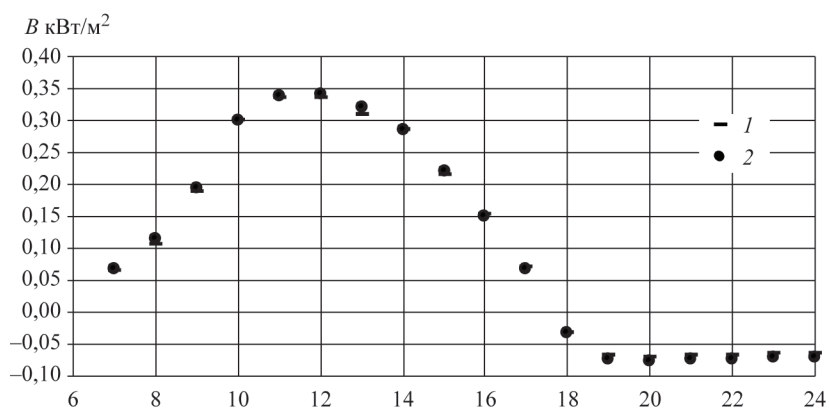


Рис. 4. Ход среднечасовых значений баланса, измеренных 11 мая 2006 г. балансомерами М-10М (1) и «Пеленг СФ-08» (2).

сравниваемым балансомерам среднечасовые значения различаются в пределах  $0,01 \text{ кВт/м}^2$  как в дневное, так и в ночное время.

Теоретические оценки, выполненные в процессе разработки нового балансомера, предсказывали хорошую сходимость данных, однако важно было подтвердить это на практике, что и удалось сделать при сравнительных измерениях.

Третьей совместной разработкой стал актинометр, получивший название «Пеленг СФ-12». При выборе конструкции актинометра зарубежные аналоги в качестве возможного прототипа не рассматривались, поскольку центральный угол большинства из них отличается от центрального угла актинометра М-3, что не может обеспечить полной сходимости рядов наблюдений. В то же время актинометр М-3, уже полвека использующийся на сети, показал высокую стабильность эксплуатационных и метрологических характеристик и поэтому был выбран в качестве прототипа.

У актинометра «Пеленг СФ-12» предусмотрены две модификации: с открытым входным отверстием и входным отверстием с защитным окном из флюорита, прозрачным в спектральной области  $0,29\text{—}9 \text{ мкм}$ , которая перекрывает спектральный диапазон солнечного излучения, достигающего земной поверхности.

Модификация актинометра без защитного окна предназначена для наблюдений вручную, в частности для срочных наблюдений. Актинометр с защитным окном предназначен для непрерывных наблюдений (по программе регистрации), поскольку не требуется закрывать его в случае выпадения осадков.

С августа по ноябрь 2007 г. в ГГО были проведены сравнения актинометра «Пеленг СФ-12» с актинометром М-3 при температуре воздуха от 1 до 30 °С. На рис. 5 представлены синхронно измеренные с дискретностью 10 с мгновенные значения выходного напряжения актинометров М-3 и «Пеленг СФ-12». Связь линейна с высокой достоверностью аппроксимации, практически равной единице, что свидетельствует как о сходимости результатов измерений актинометрами «Пеленг СФ-12» и М-3, так и об идентичности температурных коэффициентов их чувствительности в диапазоне температуры 1—30 °С.

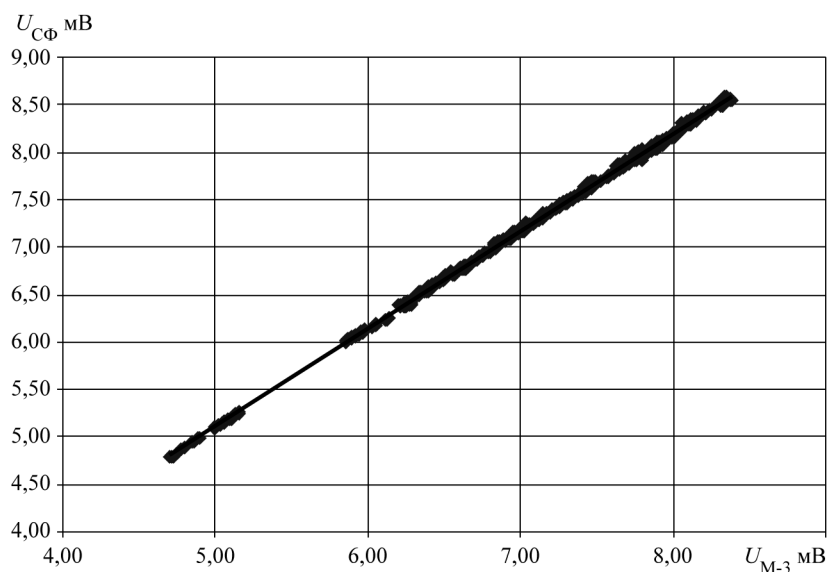


Рис. 5. Связь между выходными сигналами актинометров М-3 ( $U_{M-3}$ ) и «Пеленг СФ-12» ( $U_{CF}$ ) при сравнительных наблюдениях в ГГО в течение августа—ноября 2007 г.

Прибор для автоматизированных измерений продолжительности солнечного сияния «Пеленг ВК-05» (рис. 6) предназначен для замены гелиографа (типа ГУ-1), требующего ручной обработки лент.



Рис. 6. Прибор для автоматизированных измерений продолжительности солнечного сияния «Пеленг ВК-05» с электронным измерительным блоком.

Прибор состоит из датчика и электронного измерительного блока. Приемный элемент датчика собран из 16 фотодиодов, расположенных по окружности в два ряда: в одном ряду фотодиоды расположены горизонтально, в другом — наклонно, благодаря чему суммарная диаграмма их направленности охватывает полусферу и обеспечивается работоспособность датчика при любом положении Солнца. При наличии солнечного сияния на чувствительные площадки одних фотодиодов поступает прямая солнечная и рассеянная радиация, на другие — только рассеянная. Фотодиоды, расположенные по диагонали, включены навстречу, что позволяет получать информацию о прямой солнечной радиации в виде разности между суммарной и рассеянной. В случае когда эта разность достигает установленного нижнего порогового значения, соответствующего энергетической освещенности  $120 \text{ Вт/м}^2$  (рекомендовано ВМО), срабатывает электронный блок и определяются время начала и продолжительность периода, в течение которого сигнал равен или превышает пороговый



уровень. По запросу оператора измерительный блок выдает в цифровом виде продолжительность солнечного сияния за различные интервалы времени: 10, 30, 60 мин, 3, 24 ч.

Сравнение значений продолжительности солнечного сияния, полученных по прибору «Пеленг ВК-05», определенных по результатам непрерывных измерений прямой солнечной радиации актинометром М-3, а также измеренных гелиографом ГУ-1, показало хорошую сходимость результатов.

### **Заключение**

В 2007 г. завершена разработка полного комплекта актинометрических средств измерений, включающего следующие датчики: пиранометр «Пеленг СФ-06», балансомер «Пеленг СФ-08» и актинометр «Пеленг СФ-12», которые являются модернизированной модификацией приборов конструкции Ю.Д. Янишевского (актинометра М-3, пиранометра М-80М и балансомера М-10М), а также прибора для автоматизированных измерений продолжительности солнечного сияния «Пеленг ВК-05».

Взамен морально устаревших и снятых с производства гальванометров, самописцев и интеграторов разработан электронный измерительный блок с цифровым индикаторным табло, обеспечивающий более высокую точность измерений, удобство в работе, автоматизированные измерения часовых сумм радиации.

Разработанные датчики и измерительные приборы соответствуют современному техническому уровню и обеспечивают работу станций по всем трем программам актинометрических наблюдений: регистрация, срочные наблюдения и интегрирование.

Приборы успешно прошли испытания в Госстандарте России на утверждение типа, сертификаты выданы обоим разработчикам: ГУ «ГГО» и ОАО «Пеленг». Выпуск приборов производится ОАО «Пеленг», внедрение их на сеть осуществляется под методическим руководством ГГО.

Внедрение актинометрических датчиков типа «Пеленг» не требует изменения методики наблюдений. Схема и порядок метрологического обеспечения датчиков также сохраняется.

Новые актинометрические приборы обеспечивают сохранность рядов наблюдений, позволяют использовать для их установки имеющееся на сети вспомогательное и поверочное оборудование.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зачек С. И., Тайц Д. А., Горбенко Ю. Д., 1985. Полупроводниковый термоэлектрический пиранометр ПП-1. — Труды ГГО, вып. 487, с. 63—71.

Луцько Л. В., Бычкова А. П., Клеванцова В. А., Павлов А. В., Соколенко С. А., 2004. Результаты разработки и испытаний нового пиранометра для актинометрической сети. — Тезисы докладов Международного симпозиума стран СНГ «Атмосферная радиация», 22—25 июня 2004 г., Санкт-Петербург.

РД 52.04.562-96, 1997. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 5 Актинометрические наблюдения. Часть 1. Актинометрические наблюдения на станциях. — М.: Росгидромет. — 222 с.

Янишевский Ю. Д., 1957. Актинометрические приборы и методы наблюдений. — Л.: Гидрометеоздат. — 409 с.

УДК 551.510.534

**УЧЕТ РАССЕЯНИЯ РАДИАЦИИ ПРИ ГРАДУИРОВКЕ  
ОЗОНОМЕТРОВ М-124**

*В. М. Игнатенко*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

*Проведены расчеты потоков излучения из зенита неба. Результаты расчетов использовались для градуировки озонметров М-124.*

**THE INCLUSION OF SCATERING RADIATION TO  
CALIBRATION OF OZONOMETRS M-124**

*V. M. Ignatenko*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*The calculation of the stream of radiation from zenith are performed. Results of calculations are used to calibration of ozonometrs M-124.*

**Введение**

В настоящее время общее содержание озона на территории России измеряется в основном приборами типа М-124 как по прямому солнечному свету, так и по рассеянному свету из зенита неба. Зенитные измерения общего содержания озона играют важную роль при наличии облачности, когда невозможно провести измерения общего содержания озона по прямому солнечному свету. Между тем градуировка озонметров М-124 по свету из зенита неба сопряжена с определенными трудностями, к которым следует отнести невозможность получить достаточный объем экспериментальных данных при малой высоте солнца, и поэтому полученные по экспериментальным данным зависимости приходится аппроксимировать некоторыми функциями, в частности полиномами. Надежность такой аппроксимации связана с физической обоснованностью используемых для аппроксимации функций. В связи с этим задачей исследования было выявление физически обоснован-

ных зависимостей, которые можно использовать при градуировке озонметров М-124 по свету из зенита неба.

### 1. Результаты расчетов потоков ультрафиолетового излучения, поступающего из зенита ясного неба

При проведении расчетов использовалась зависимость плотности воздуха от высоты (Стандартная атмосфера, 1973) и плотность озона  $\rho_{O_3h}$  при общем содержании озона ( $X$ ), равном 0,3 атм-см (Ozon, 1992). Спектральная плотность потока ультрафиолетовой (УФ) радиации на единицу телесного угла приемника излучения для высоты солнца от 5 до 70° с шагом 1° для диапазона длин волн от 290 до 380 нм рассчитывалась по изложенному в приложении алгоритму. В табл. 1 приведены значения спектральной плотности потока из зенита первой кратности

Таблица 1

**Поток ультрафиолетовой радиации из зенита неба первой кратности рассеяния  $Вт \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$  при  $X = 0,3$  атм-см в зависимости от длины волны  $\lambda$  и высоты солнца**

$\lambda$ нм	Высота солнца, град.					
	5	10	15	20	40	60
290	$4,04 \cdot 10^{-6}$	$4,13 \cdot 10^{-6}$	$4,28 \cdot 10^{-6}$	$4,48 \cdot 10^{-6}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$7,11 \cdot 10^{-6}$
294	$4,53 \cdot 10^{-6}$	$4,64 \cdot 10^{-6}$	$4,82 \cdot 10^{-6}$	$5,06 \cdot 10^{-6}$	$7,31 \cdot 10^{-6}$	$1,91 \cdot 10^{-5}$
296	$4,67 \cdot 10^{-6}$	$4,82 \cdot 10^{-6}$	$5,08 \cdot 10^{-6}$	$5,47 \cdot 10^{-6}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$	$7,68 \cdot 10^{-5}$
300	$5,57 \cdot 10^{-6}$	$6,61 \cdot 10^{-6}$	$8,79 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$7,71 \cdot 10^{-4}$
302	$6,97 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$3,92 \cdot 10^{-5}$	$5,21 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$
304	$9,25 \cdot 10^{-6}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$4,11 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$
306	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$2,57 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$4,79 \cdot 10^{-3}$
310	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$4,74 \cdot 10^{-4}$	$9,85 \cdot 10^{-4}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$8,94 \cdot 10^{-3}$
315	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$8,36 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$
320	$6,08 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-3}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$
330	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$	$8,56 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-2}$	$3,78 \cdot 10^{-2}$
340	$2,92 \cdot 10^{-3}$	$6,04 \cdot 10^{-3}$	$9,40 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-2}$	$3,64 \cdot 10^{-2}$
350	$3,23 \cdot 10^{-3}$	$6,45 \cdot 10^{-3}$	$9,71 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	$3,40 \cdot 10^{-2}$
360	$3,58 \cdot 10^{-3}$	$7,01 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$2,42 \cdot 10^{-2}$	$3,37 \cdot 10^{-2}$

рассеяния, в табл. 2 — отношение потока второй кратности рассеяния к суммарному потоку первой и второй кратности рассеяния. Анализ табл. 1—2 показывает, что в коротковолновой УФ области спектра плотность потоков первой и второй кратности рассеяния существенно меньше, чем в длинноволновой УФ области. С увеличением высоты солнца эти потоки, как правило, возрастают. Отношение спектральной плотности потока второй кратности рассеяния к суммарному потоку первой и второй кратности рассеяния возрастает с увеличением длины волны и высоты солнца. Упомянутое отношение при фиксированной высоте солнца в некотором интервале длин волн практически не изменяется.

Таблица 2

**Отношение потока ультрафиолетовой радиации из зенита неба второй кратности рассеяния к суммарному потоку из зенита неба первой и второй кратности рассеяния при  $X = 0,3$  атм-см в зависимости от длины волны  $\lambda$  и высоты Солнца**

$\lambda$ нм	Высота солнца, град.					
	5	10	15	20	40	60
290	0	0	0	0	0	0
294	0	0	0	0	0,02	0,07
298	0,01	0,01	0,02	0,03	0,13	0,11
300	0,02	0,04	0,06	0,10	0,15	0,11
302	0,06	0,08	0,11	0,15	0,15	0,12
304	0,10	0,13	0,16	0,18	0,16	0,12
306	0,14	0,17	0,19	0,20	0,16	0,12
308	0,18	0,20	0,21	0,21	0,16	0,12
310	0,21	0,22	0,22	0,22	0,16	0,12
315	0,25	0,24	0,24	0,22	0,16	0,12
320	0,26	0,25	0,23	0,22	0,16	0,11
330	0,25	0,24	0,23	0,21	0,15	0,11
340	0,24	0,23	0,21	0,19	0,14	0,10
350	0,23	0,21	0,19	0,18	0,13	0,09
360	0,21	0,19	0,18	0,16	0,12	0,08

## 2. Анализ возможности применения теории рассеяния для градуировки озонметров М-124

Озонметр М-124 содержит два светофильтра, спектральные чувствительности которых  $\omega_{\lambda 1}$ ,  $\omega_{\lambda 2}$  имеют максимумы при  $\lambda = 302$  нм и  $\lambda = 326$  нм соответственно. При измерении общего содержания озона используется отношение отсчетов сигналов по упомянутым двум светофильтрам. По рассчитанным ранее значениям спектральной плотности потоков из зенита неба можно вычислить отношения отсчетов по двум светофильтрам. Была найдена величина

$$p = (I_{z12}/I_{z22})/(I_{z11}/I_{z21}), \quad (1)$$

где

$$I_{z12} = \int \omega_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 12} d\lambda, \quad (2)$$

$$I_{z22} = \int \omega_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 12} d\lambda, \quad (3)$$

$$I_{z11} = \int \omega_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda, \quad (4)$$

$$I_{z21} = \int \omega_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 1} d\lambda, \quad (5)$$

$\Phi_{\lambda 1}$  — поток ультрафиолетовой радиации из зенита первой кратности рассеяния,  $\Phi_{\lambda 12}$  — поток ультрафиолетовой радиации из зенита, равный сумме потоков первой и второй кратности рассеяния.

В табл. 3 приведены средние значения величины  $p$  по данным, полученным с помощью 93 приборов типа М-124, и предельные отклонения  $\Delta p_{\min}$  и  $\Delta p_{\max}$  от  $p$  по этой группе приборов. Из таблицы видно, что добавление второй кратности рассеяния позволяет уточнить отношение отсчетов примерно на 4 %, хотя в соответствии с табл. 2 вклад второй кратности рассеяния в поток из зенита может составлять 20 %. Из табл. 2 видно, что приборы для измерения общего содержания озона по отношению отсчетов по двум светофильтрам, работающие в диапазоне длин волн от 305 до 360 нм, будут мало чувствительны к вкладу второй кратности рассеяния, поскольку в упомянутом диапазоне длин волн поток второй кратности рассеяния пропорционален потоку первой кратности рассеяния. Из табл. 3 видно, что предельные отклонения величины  $p$  от среднего значения довольно малы, поэтому расчетное отноше-

ние отсчетов по двум светофильтрам с учетом первой и второй кратности рассеяния можно найти, определив его для первой кратности рассеяния и умножив на  $p$ . При высоте солнца больше  $10^\circ$  величина  $p$  практически не зависит от высоты солнца, что позволяет в этом случае рассчитывать зенитный коэффициент в приближении однократного рассеяния (Гущин и др., 1984в). Поскольку добавление второй кратности рассеяния приводит к изменению отношения отсчетов в пределах 4 %, то добавление третьей кратности рассеяния будет приводить к существенно меньшему изменению отношения отсчетов. Это связано, в частности, с увеличением длины пути, проходимого ультрафиолетовой радиацией до попадания на прибор.

Таблица 3

**Множитель, учитывающий вклад второй кратности рассеяния при расчете отношения отсчетов сигналов по двум светофильтрам**

$\theta^\circ$	$p$	$\Delta p_{\min}$	$\Delta p_{\max}$
5	0,976	-0,007	0,006
6	0,981	-0,006	0,005
7	0,985	-0,005	0,005
8	0,988	-0,004	0,005
9	0,991	-0,004	0,005
10	0,993	-0,003	0,005
12	0,998	-0,003	0,005
14	1,002	-0,003	0,005
15	1,003	-0,003	0,005
20	1,009	-0,002	0,005
30	1,013	-0,002	0,005
40	1,013	-0,001	0,004
50	1,012	-0,001	0,003
60	1,010	-0,001	0,003
70	1,009	-0,001	0,002

С помощью озонметра М-124 измеряют общее содержание озона при наблюдениях по солнцу и по зениту. При наблюдениях по зениту измеренное и расчетное отношения отсчетов по двум светофильтрам связаны между собой соотношением (Шаламянский и др., 2001)

$$\begin{aligned} & (\int \omega_{\lambda 1} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X + \beta_{\lambda} m)} d\lambda) / (\int \omega_{\lambda 2} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X + \beta_{\lambda} m)} d\lambda) = \\ & = K_z(\mu, X) K_1 K_T (I_{1z} / I_{2z}), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mu$  — озонная масса, выражаемая по известным формулам через высоту солнца над горизонтом;  $X$  — общее содержание озона;  $\alpha_{\lambda}$  — показатель ослабления озона;  $\beta_{\lambda}$  — оптическая плотность рэлеевской атмосферы;  $m$  — воздушная масса,  $K_T$  — температурный коэффициент озонметра М-124;  $K_z(\mu, X)$  — зенитный коэффициент, определяемый при градуировке озонметра по зениту ясного неба;  $K_1$  — коэффициент, учитывающий наличие облачности.

Определение общего содержания озона при наблюдениях по зениту сводится к решению уравнения (6). Зенитный коэффициент можно представить в виде суммы:

$$K_z(\mu, X) = K_z(\mu, X_0) + (X - X_0)C(\mu), \quad (7)$$

где  $K_z(\mu, X_0)$  — зенитный коэффициент;  $X_0 = 0,3$  атм-см ( для каждого прибора свой коэффициент);  $C(\mu)$  — функция от озонной массы, одинаковая для всех приборов. В настоящее время нами используется значение  $C(\mu)$ , найденное К. И. Ромашкиной по результатам измерения зависимости зенитных коэффициентов разных приборов М-124 от общего содержания озона. Достоверность величины  $C(\mu)$  косвенно подтверждена результатами параллельных измерений общего содержания озона по солнечным и по зенитным наблюдениям на сети станций. Поскольку величина  $C(\mu)$  известна, то градуировка приборов по зениту неба сводится к определению зенитного коэффициента  $K_z(\mu, X_0)$ . При градуировке озонметров по зениту ясного неба общее содержание озона  $X$  измеряется с помощью спектрофотометра Добсона, а облачный коэффициент  $K_1$  полагается равным единице.

Из соотношений (6) и (7) получим

$$\begin{aligned} K_z(\mu, X_0) = & ((\int \omega_{\lambda 1} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X + \beta_{\lambda} m)} d\lambda) / \\ & / (\int \omega_{\lambda 2} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X + \beta_{\lambda} m)} d\lambda)) / (K_T (I_{1z} / I_{2z})) - (X - X_0)C(\mu). \end{aligned} \quad (8)$$

Зенитный коэффициент  $K_z(\mu, X_0)$  необходимо измерять во всем диапазоне высоты солнца от 5 до 70°. Поэтому одной из задач данной



работы было снятие ограничения по высоте солнца при измерении  $K_z(\mu, X_0)$ .

Величину  $K_z(\mu, X_0)$  можно представить в виде

$$K_z(\mu, X_0) = \left( \int \omega_{\lambda 1} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X_0 + \beta_{\lambda} m)} d\lambda \right) / \left( \int \omega_{\lambda 2} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X_0 + \beta_{\lambda} m)} d\lambda \right) / (I_{1z} / I_{2z})_{X_0} \quad (9)$$

Из соотношений (8) и (9) выразим отношение отсчетов  $(I_{1z} / I_{2z})_{X_0}$ , приведенное к  $X = X_0$ :

$$(I_{1z} / I_{2z})_{X_0} = \left( \int \omega_{\lambda 1} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X_0 + \beta_{\lambda} m)} d\lambda \right) / \left( \int \omega_{\lambda 2} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X_0 + \beta_{\lambda} m)} d\lambda \right) / K_z(\mu, X_0), \quad (10)$$

где  $K_z(\mu, X_0)$  определяется по формуле (9)

Для проверки изложенной выше теории рассеяния рассчитывалась величина

$$(I_{1z} / I_{2z})_{X_0 \text{ теор}} = \int \omega_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 12}(\mu) d\lambda / \int \omega_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 12}(\mu) d\lambda, \quad (11)$$

после чего вычислялось отношение

$$K_0 = (I_{1z} / I_{2z})_{X_0 \text{ теор}} / (I_{1z} / I_{2z})_{X_0}. \quad (12)$$

При высоте солнца больше  $5^\circ$  коэффициент  $K_0$  практически от нее не зависел. Были найдены среднее значение  $K_{0 \text{ ср}}$  и зенитный коэффициент  $K_{z \text{ теор}}(\mu, X_0)$ :

$$K_{z \text{ теор}}(\mu, X_0) = (1 / K_{0 \text{ ср}}) \left[ \left( \int \omega_{\lambda 1} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X_0 + \beta_{\lambda} m)} d\lambda \right) / \left( \int \omega_{\lambda 2} S_{\lambda} 10^{-(\alpha_{\lambda} \mu X_0 + \beta_{\lambda} m)} d\lambda \right) \right] / \left( \int \omega_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 12}(\mu) d\lambda / \int \omega_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 12}(\mu) d\lambda \right). \quad (13)$$

Из соотношения (13) видно, что зенитный коэффициент выражается в виде произведения коэффициента  $1 / K_{0 \text{ ср}}$  на известную функцию, которая может быть рассчитана для каждого озонметра типа М-124 по его спектральной чувствительности  $\omega_{\lambda 1}, \omega_{\lambda 2}$ .

В качестве примера в табл. 4 приведены зенитные коэффициенты, найденные по традиционной методике ( $K_{z1}$ ) и с использованием пред-

ложенного алгоритма ( $K_{z2}$ ) по данным градуировки за 2003 г. Из таблицы видно, что различия между  $K_{z1}$  и  $K_{z2}$  находятся в пределах погрешностей измерения отношений отсчетов по двум светофильтрам и в основном составляют несколько тысячных. При малой высоте солнца различия между  $K_{z1}$  и  $K_{z2}$  могут достигать нескольких сотых, что обусловлено как погрешностями измерения отношения сигналов по двум светофильтрам приборов типа М-124, так и малым объемом экспериментальных данных при упомянутых значениях высоты солнца.

Таблица 4

**Зенитные коэффициенты, найденные по традиционной методике ( $K_{z1}$ ) и с использованием предложенного алгоритма ( $K_{z2}$ ) по данным градуировки за 2003 г.**

$\theta^\circ$	Номер прибора			
	266		365	
	$K_{z1}$	$K_{z2}$	$K_{z1}$	$K_{z2}$
5	0,239	0,239	0,231	0,230
6	0,284	0,280	0,273	0,270
7	0,329	0,320	0,312	0,309
8	0,370	0,358	0,351	0,347
9	0,407	0,394	0,390	0,383
10	0,441	0,428	0,426	0,416
11	0,472	0,460	0,458	0,446
12	0,499	0,488	0,486	0,474
13	0,524	0,515	0,501	0,500
14	0,546	0,539	0,533	0,520
15	0,567	0,561	0,553	0,544
20	0,643	0,646	0,623	0,623
30	0,728	0,740	0,705	0,713
40	0,772	0,787	0,755	0,758
50	0,798	0,814	0,789	0,784
60	0,814	0,831	0,811	0,800

## Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что для приборов типа М-124 зенитный коэффициент можно рассчитывать с учетом первой кратности рассеяния радиации из зенита неба, а вторую кратность рассеяния радиации из зенита неба учитывать, вводя некий одинаковый для всех приборов типа М-124 множитель, зависящий от высоты солнца и изменяющийся на несколько процентов в диапазоне высоты солнца от 5 до 60°.

Зенитные коэффициенты, найденные расчетным способом с учетом двух кратностей рассеяния, отличаются от аналогичных величин, найденных по экспериментальным данным градуировки озонметров М-124, лишь постоянным множителем. Таким образом, задача нахождения физически обоснованных зависимостей, которые можно использовать при градуировке озонметров М-124, решена.

*Автор работы выражает благодарность Г. П. Гуцину за практические советы и рекомендации, которые позволили написать настоящую работу.*

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Расчетные соотношения для оценки спектральной плотности потока ультрафиолетового излучения из зенита ясного неба

При выводе расчетных соотношений использовалась декартова система координат  $XOZ$  с началом в центре Земли (рис. 1), причем прямые солнечные лучи были параллельны плоскости  $XOZ$ . Основные понятия и величины взяты из работы Гуцина (1973).

При однократном рассеянии поток ультрафиолетовой радиации проходит путь  $CBA$  (см. рис. 1). Приемник излучения уста-

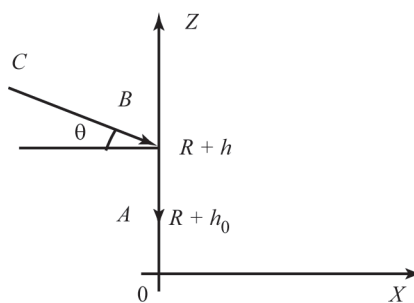


Рис. 1. Схема распространения ультрафиолетовой радиации при однократном рассеянии.

новлен в точке  $A$  ( $z = R + h_0$ ) оси  $z$ , и на него попадает ультрафиолетовая радиация, рассеянная по рэлеевскому закону в элементарном объеме  $dv$  при  $z = R + h$  в точке  $B$ , где  $R$  — радиус Земли.

В работе Гущина и др. (1983) выведено соотношение для спектральной плотности однократно рассеянного потока ультрафиолетовой радиации, попадающего в точку  $A$ . Оно получено посредством интегрирования элементарных потоков ультрафиолетовой радиации в пределах от  $z = R + h_0$  до  $z = R + H$ :

$$\Phi_{\lambda 1} = S_{\lambda} [6,9 \beta_{\lambda} / (16\pi H_0 \rho_0)] (1 + \sin^2 \theta) d\Omega \int_{R+h_0}^{R+H} \rho_h T(h, H) T(h_0, h) dh, \quad (\text{П.1})$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения;  $S_{\lambda}$  — спектральная плотность потока ультрафиолетовой радиации на границе атмосферы ( $h = H$ );  $\beta_{\lambda}$  — оптическая плотность рэлеевской атмосферы;  $\rho_0$  — плотность воздуха в нормальных условиях;  $\rho_h$  — плотность воздуха на высоте  $h$ ;  $\theta$  — высота солнца над горизонтом;  $d\Omega$  — телесный угол поля зрения приемника излучения;  $T(h, H)$  — коэффициент пропускания атмосферы на отрезке  $CB$ :

$$T(h, H) = 10^{-\int_{R+h_0}^{R+H} (\alpha_{\lambda} \rho_{O_3 h_c} + \beta_{\lambda} \rho_{h_c} / (H_0 \rho_0)) \operatorname{cosec} \theta_{h_c} dh_c}, \quad (\text{П.2})$$

где  $\rho_{O_3 h_c}$  — плотность озона на высоте  $h_c$ ,  $\rho_{h_c}$  — плотность воздуха на высоте  $h_c$ ,

$$H_0 \rho_0 = \int_R^{R+H} \rho_h dh, \quad (\text{П.3})$$

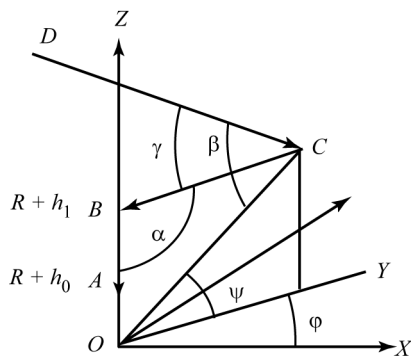
$$(\operatorname{cosec} \theta_{h_c})^2 = 1 / (1 - (\cos \theta (R + h) / (R + h_c))^2); \quad (\text{П.4})$$

$\alpha_{\lambda}$  — показатель поглощения излучения озоном, отнесенный к длине волны  $\lambda$ ;  $\beta_{\lambda}$  — оптическая плотность рэлеевской атмосферы;  $T(h_0, h)$  — коэффициент пропускания атмосферы на отрезке  $BA$ :

$$T(h_0, h) = 10^{-\int_{R+h_0}^{R+h} (\alpha_{\lambda} \rho_{O_3 h_c} + \beta_{\lambda} \rho_{h_c} / (H_0 \rho_0)) dh_c}. \quad (\text{П.5})$$

Рис. 2. Схема распространения ультрафиолетовой радиации при двукратном рассеянии.

Покажем, как рассчитывался поток двукратно рассеянной ультрафиолетовой радиации, попадающей из зенита неба на приемник излучения. Упомянутый поток проходит путь  $DCBA$  (рис. 2). Приемник излучения находится в точке  $A$ ,  $|OA| = R + h_0$ ,  $|OB| = R + h_1$ ,  $|OC| = R + h$ ,  $|OD| = R + H$ . Направление падения прямых солнечных лучей составляет угол  $\theta$  (высота солнца над горизонтом) с плоскостью  $XOY$ ,  $\phi$  — угол между проекцией  $OC$  на плоскость  $XOY$  и осью  $OX$ ,  $\psi$  — угол между  $OC$  и упомянутой проекцией  $OC$ . Введем следующие обозначения:  $\angle DCB = \gamma$ ,  $\angle DCO = \beta$ ,  $\angle CBA = \alpha$ . Величины  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $|BC|$  рассчитывались с использованием формул векторного анализа и соотношений, учитывающих связь координат точки в сферической и декартовой системах координат.



Элементарный поток ультрафиолетовой радиации, попадающий в точку  $A$ , описывается следующей формулой:

$$d\Phi_{\lambda 2} = S_{\lambda} T_{DC} f_C T_{CB} f_B T_{BA}, \quad (\text{П.6})$$

где  $T_{DC}$ ,  $T_{CB}$ ,  $T_{BA}$  — коэффициенты пропускания атмосферы на участках  $DC$ ,  $CB$ ,  $BA$ ,  $f_C$ ,  $f_B$  — коэффициенты, характеризующие рэлеевское рассеяние ультрафиолетовой радиации в элементарных объемах в точках  $C$  и  $B$ .

Для определения величин  $T_{DC}$ ,  $T_{CB}$ ,  $T_{BA}$  использовались соотношения типа (П.2). Доля потока  $f_C$ , рассеянного в элементарном объеме  $dv_C$  в направлении  $CB$ , составит

$$f_C = (\beta(\gamma, \lambda, h) / |BC|^2) dv_C, \quad (\text{П.7})$$

где  $\beta(\gamma, \lambda, h)$  — объемный коэффициент рэлеевского рассеяния:

$$\beta(\gamma, \lambda, h) = (6,9 \beta_{\lambda} \rho_h / (16\pi H_0 \rho_0)) (1 + \cos^2 \gamma), \quad (\text{П.8})$$

$$dv_C = (R + h)^2 \cos \psi d\psi d\phi dh. \quad (\text{П.9})$$

Долю потока  $f_B$ , рассеянного в элементарном объеме  $dv_B$  в направлении на приемник излучения, можно представить в виде

$$f_B = (\beta(\alpha, \lambda, h_1) / (h - h_0)^2) dv_B, \quad (\text{П.10})$$

где

$$dv_B = (h_1 - h_0)^2 d\Omega dh_1, \quad (\text{П.11})$$

$$\beta(\alpha, \lambda, h_1) = (6,9 \beta_{\lambda \rho h_1} / (16\pi H_0 \rho_0))(1 + \cos^2 \alpha). \quad (\text{П.12})$$

Полный поток второй кратности рассеяния получается интегрированием:

$$\Phi_{\lambda 2} = \int d\Phi_{\lambda 2}. \quad (\text{П.13})$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гущин Г. П., Виноградова Н. Н., 1983. Суммарный озон в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат. — 241 с.
- Гущин Г. П., 1973. Терминология и обозначения, применяемые в атмосферной оптике и озонometriи. — Труды ГГО, вып. 312, с. 97—120.
- Гущин Г. П., Соколенко С. А., 1984. К методике измерения суммарного озона по ультрафиолетовому излучению от зенита неба. — Труды ГГО, вып. 472, с. 31—35.
- Стандартная атмосфера. Параметры. Гост 4401-73, 1977. М.: Изд-во стандартов.
- Шаламянский А. М., Ромашкина К. И., Игнатенко В. М., 2001. Усовершенствование методики измерений общего содержания озона по свету от зенита неба. — Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), вып. 3(549), с. 181—189.
- Ozon data for the world, March—April 1992. — Downsview—Ontario, V. 33. 2.

УДК 551.510

**ПОТЕПЛЕНИЕ КАК ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА  
ПОВЫШЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ  
АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДОВ**

*Э. Ю. Безуглая, И. А. Воробьева, Т. П. Ивлева, Е. Л. Махоткина*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

*Рассмотрены изменения атмосферного воздуха в связи с потеплением атмосферы, и в частности уменьшение концентрации примесей в городской атмосфере. По данным за 1995—2006 гг. на метеостанциях отмечается заметное увеличение прозрачности атмосферы. Результаты наблюдений за концентрацией оксида и диоксида азота в 19 городах, расположенных в различных районах России, позволили установить, что химическая активность атмосферы, выраженная через отношение диоксида азота к сумме оксидов азота, за десять лет увеличилась на 11—66 %. Это, вероятно, связано с повышением температуры воздуха на территории России.*

*Приведенные данные позволяют сделать определенный вывод о том, что глобальное потепление атмосферы приводит к изменению скорости реакций, происходящих в атмосфере, т. е. к повышению химической активности атмосферного воздуха.*

**WARMING AS POSSIBLE REASON FOR ATMOSPHERIC AIR  
CHEMICAL ACTIVITY INCREASE IN CITIES**

*E. Yu. Bezuglaya, I. A. Vorobyeva, T. P. Ivleva, E. L. Makhotkina*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*Changes in atmospheric air due to global warming are discussed. Decrease of impurities concentration in atmosphere of the cities is discovered. Significant transparency increase was discovered for the period of 1995-2006 at major part of Russia. Transformation factors (TF) of oxide sum into dioxide were determined. They are based on observation data of oxides and dioxides in 19 cities located at different regions of Russia.*

*Chemical activity increase of atmosphere denoted via TF was discovered. It was equal to 11—66 % during last ten years. It can be possibly a result of temperature increase in the territory of Russia. Presented data assumes to propose that global warming of atmosphere changes velocity of reactions taking place in atmosphere, that is increasing its reactivity.*

### **Влияние метеорологических условий на уровень загрязнения**

В воздушный бассейн городов непрерывно поступают десятки и даже сотни различных веществ, выбрасываемых промышленными объектами, автотранспортом, многочисленными котельными и другими производствами. Выбросы представляют собой смесь разнообразных газообразных веществ, твердых и жидких взвешенных частиц, из которых многие содержатся в атмосферном воздухе в больших концентрациях. Атмосфера является огромным реактором, в котором непрерывно происходят различные химические и фотохимические реакции с разрушением одних веществ и образованием других. Атмосфера постоянно стремится к созданию равновесных условий, но поступающие в нее с выбросами химические вещества стремятся это равновесие нарушить. Важную роль в этих процессах играют метеорологические условия. При неблагоприятных погодных условиях, высокой инсоляции и слабом ветре фотохимические реакции могут приводить к значительному увеличению концентраций до уровней, опасных для человека.

Среди веществ, поступающих в атмосферный воздух городов, особый интерес в последние годы представляет формальдегид (НСНО). Выбросы формальдегида промышленными предприятиями невелики, но его концентрация, измеряемая в атмосферном воздухе городов, достигает значений, превышающих предельно допустимую концентрацию (ПДК) в несколько раз. В последние годы число городов, в которых концентрации формальдегида превышают ПДК, возрастает (рис. 1). Как показывает анализ результатов измерений, формальдегид почти отсутствует в атмосферном воздухе зимой, а при повышении температуры воздуха летом его концентрация существенно возрастает.

Для выяснения причин появления высоких концентраций формальдегида проанализированы представленные ОМОС г. Ханты-Мансийска данные по городам Белоярский, Березово, Нижневартовск и Радужное за 2006 г.



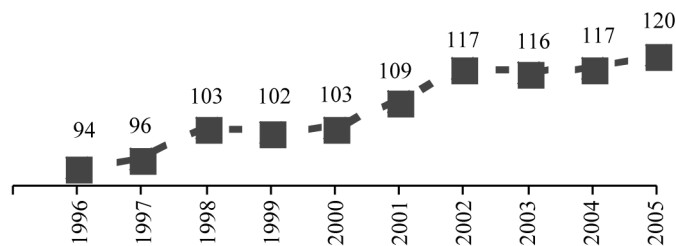


Рис. 1. Число городов, в которых среднегодовая концентрация формальдегида превышает ПДК.

В перечисленных городах не только разовые, но и средние значения концентраций формальдегида превышают ПДК. Средняя концентрация формальдегида в 2006 г. превысила ПДК в Белоярском в 9,7 раза, в Нижневартовске в 14,3 раза, в Радужном в 3,7 раза. По данным о выбросах промышленных предприятий в рассматриваемых населенных пунктах формальдегид поступает в атмосферу в несущественном количестве.

По результатам 3968 наблюдений в Белоярском, Ханты-Мансийске, Радужном были получены зависимости концентрации формальдегида от температуры воздуха (рис. 2). При этом, чтобы исключить неопределенности, в анализе использовались концентрации формальдегида выше  $10 \text{ мкг/м}^3$ .

В Белоярском при отрицательной температуре воздуха концентрация формальдегида изменяется мало, а при положительной — возрастает. Аналогичный характер зависимости наблюдается в Радужном. Коэффициенты корреляции между концентрацией формальдегида и температурой воздуха составили в Белоярском 0,76 в Радужном 0,6.

Можно сделать вывод о том, что образование формальдегида в атмосфере этих городов в значительной степени определяется фотохимическими реакциями, протекающими в атмосфере. При этом чем выше температура воздуха, тем интенсивнее протекают реакции, и концентрация формальдегида возрастает.

Связь между температурой воздуха и концентрацией формальдегида в атмосфере в Березово и Нижневартовске хотя и наблюдается, но выражена слабее, чем в Радужном и Белоярском. Нижневартовск — город с большим числом источников выбросов и сравнительно большой численностью населения. Поэтому связь концентрации формальдегида

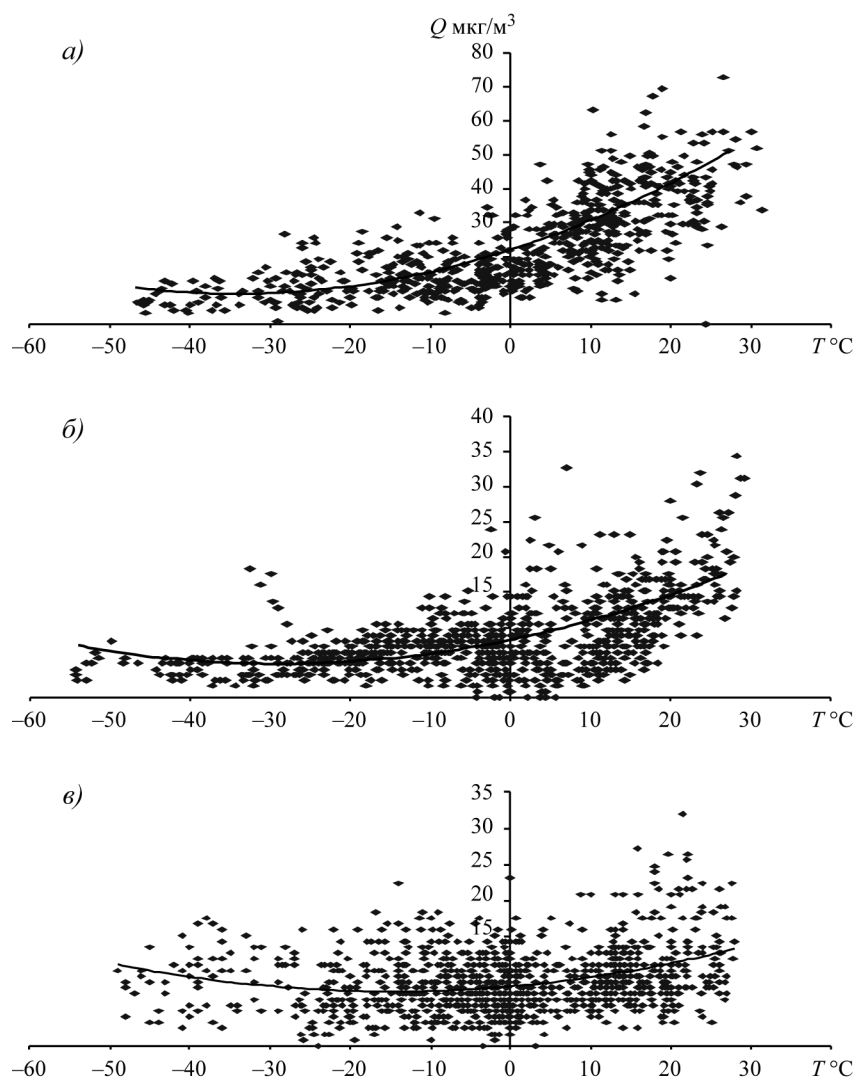
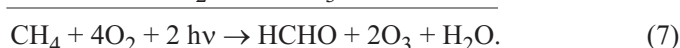
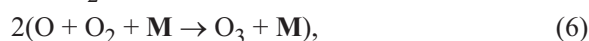
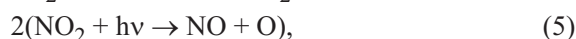
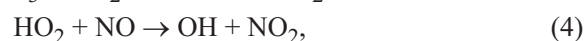
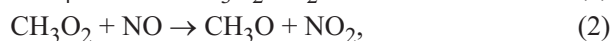
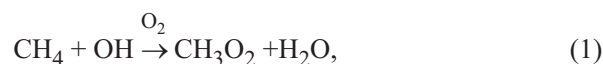


Рис. 2. Распределение концентрации формальдегида ( $Q$   $\mu\text{г}/\text{м}^3$ ) в зависимости от температуры воздуха ( $T$   $^{\circ}\text{C}$ ) в 2006 г. в Белоярском (а), Радужном (б) и Нижневартовске (в).

с температурой воздуха может затухать под влиянием других городских источников загрязнения.

Формирование высоких концентраций формальдегида в атмосфере происходит в основном вследствие протекания окислительно-восстановительных реакций с участием метана, продуктов природного топлива, оксидов азота. Общая схема протекания реакций окисления метана с образованием формальдегида описана в работе Seinfeld, Pandis (1997):



Как следует из представленных уравнений, метан является одним из основных исходных продуктов для образования формальдегида в атмосфере. Для протекания реакций требуются также углеводороды и солнечная энергия.

Рассматриваемые города находятся в зоне повышенного потенциала загрязнения атмосферы (ПЗА). В воздушном бассейне этих городов может происходить накопление веществ, являющихся исходными продуктами для образования формальдегида. Можно предположить, что формирование высоких концентраций формальдегида связано с близостью нефтяных скважин, значительными выбросами метана и углеводородов, заболоченностью окружающей местности и повышением температуры воздуха.

В табл. 1 приведены уравнения связи между концентрацией формальдегида ( $Q$ ) и температурой воздуха ( $T$ ) для рассматриваемых городов, а также для городов Березово и Норильска из работы Воробьева (2008).

При повышении температуры воздуха на  $10^\circ\text{C}$  концентрация формальдегида возрастает на  $1\text{—}13 \text{ мкг/м}^3$  в зависимости от уровня загрязнения и, вероятно, от наличия в воздухе различных веществ, которые могут служить катализаторами.

Таблица 1

Уравнения связи между концентрацией формальдегида ( $Q$  мкг/м<sup>3</sup>) и температурой воздуха ( $T$  °С) для рассматриваемых городов, коэффициенты корреляции ( $R$ ), расчетные значения увеличения концентрации формальдегида при повышении температуры воздуха от 10 до 20 °С ( $\Delta Q_1$ ) и от 20 до 30 °С ( $\Delta Q_2$ )

Город	Уравнение	$R$	$Q$	$\Delta Q_1$	$\Delta Q_2$
Радужный	$Q = 0,0039T^2 + 0,219T + 7,9$	0,60	11	3,36	4,14
Березово	$Q = 0,0013T^2 + 0,117T + 16,7$	0,43	20	0,78	0,52
Белоярский	$Q = 0,0101T^2 + 0,672T + 20,1$	0,76	29	9,75	11,77
Нижевартовск, ст. 1	$Q = 0,0032T^2 + 0,095T + 8,2$	0,33	12	1,91	2,55
Нижевартовск, ст. 2	$Q = 0,0055T^2 + 0,03T + 10$	0,27	18	1,96	3,06
Норильск, пост 10	$Q = 0,0097T^2 + 0,817T + 25,8$	0,33	14	6,86	8,0
Норильск, ст.3	$Q = 0,0057T^2 + 0,515T + 16,7$	0,37	22	11,07	13,02

Как показал анализ, увеличение концентрации формальдегида ( $\Delta Q$ ) при повышении температуры от 10 до 20 °С и от 20 до 30 °С зависит от среднего значения концентрации формальдегида в данном городе (чем выше  $Q$ , тем больше  $\Delta Q$ ). Величина  $\Delta Q$  зависит от величины концентрации (рис. 3) и в среднем составляет  $0,3Q$ .

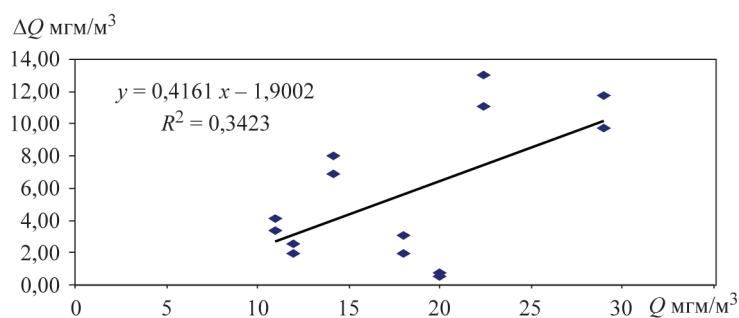


Рис. 3. Зависимость увеличения концентрации формальдегида при повышении температуры на каждые 10 °С от среднего значения его концентрации.

### Тенденция изменений содержания примесей в атмосфере

Глобальное потепление стало особенно заметным в последнее десятилетие. По последним данным на территории России среднегодовая температура приземного слоя воздуха повысилась за последние 10 лет на 1 °С (Обзор, 2007). В Приамурье и Приморье, а также в Прибайкалье и Забайкалье повышение температуры воздуха достигает 1,2 °С, что не может не сказаться на состоянии атмосферного воздуха и содержании в нем различных примесей. Вероятно, повышение температуры воздуха будет способствовать ускорению протекания реакций в атмосфере и, следовательно, изменению уровней загрязнения различными веществами.

В связи с этим интересно рассмотреть, как в настоящее время изменяются концентрации веществ, особенно примесей, содержание которых в атмосфере, как предполагается, способствует потеплению климата (диоксид углерода, метан). Общее содержание диоксида углерода в атмосфере в течение длительного времени непрерывно увеличивалось, и считается, что это является причиной потепления. При этом концентрация метана с 1998 г. почти не изменилась и даже понизилась (Обзор, 2007).

В работе Bousquet et al. (2006), подготовленной совместно 18 учеными из многих научных организаций, указывалось, что понижение концентрации метана в атмосфере частично могло бы быть объяснено уменьшением выбросов, обусловленных природными источниками, а также разрушением метана радикалом ОН. Однако в этой работе признается, что, к сожалению, пока не существует определенного мнения относительно причин уменьшения содержания метана в атмосфере. В качестве еще одной возможной причины указывается образование формальдегида в соответствии с реакцией (7).

Кроме того, за последнее десятилетие уменьшилась объемная активность радионуклидов в атмосферном воздухе, выпадения радионуклидов на подстилающую поверхность, выпадения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и  $\Sigma\beta$  на загрязненных уральским следом территориях (Тенденции, 2007).

Вернемся к характеристикам загрязнения городской атмосферы. При анализе качества воздуха, естественно, учитывались данные о выбросах промышленных предприятий и автотранспорта, опубликованные в Ежегоднике (2007). С 1990 до 1999 г. выбросы промышленными

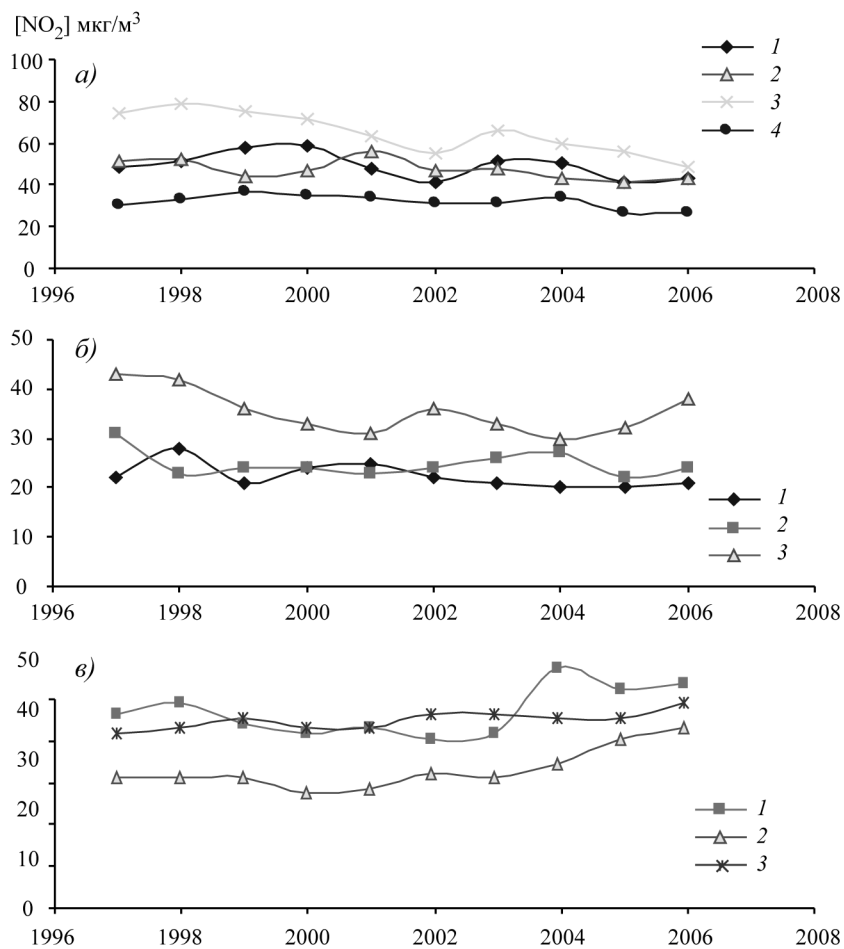


Рис. 4. Тенденция изменения средней по территории концентрации NO<sub>2</sub> по данным УГМС.

Рис. а	Рис. б	Рис. в
1 — Иркутское	1 — Мурманское	1 — Урал
2 — Приамурье	2 — Северное	2 — Красноярский край
3 — Приморское	3 — Северо-Западное	3 — Центр ЕЧР
4 — Обь-Иртышское		

предприятиями вредных веществ непрерывно уменьшались, затем в течение четырех лет были стабильны, а начиная с 2003 г. отмечается увеличение выбросов по основным веществам, наиболее заметное в крупнейших городах. Автомобильные выбросы с 1990 г. возрастают медленно, хотя число автомобилей за этот период увеличилось более чем в два раза.

За тот же десятилетний период (1990—1999 гг.) средние по городам России концентрации взвешенных веществ, диоксида серы, диоксида азота и оксида углерода уменьшились на 9,3—20 %.

Для того чтобы понять причины создавшейся ситуации, рассмотрим в качестве примера тенденцию изменения средней концентрации диоксида азота в отдельных регионах России.

За последнее десятилетие средняя концентрация диоксида азота понизилась на территории Сахалина, Приморского края, Приамурья, Забайкалья, Иркутской области (рис. 4 а), т. е. в районах наибольшего повышения температуры воздуха. Понижение концентрации диоксида азота наблюдается также в Мурманской, Архангельской и Ленинградской областях (рис. 4 б), где тоже отмечено заметное потепление.

Наблюдаемое понижение концентрации  $\text{NO}_2$  на больших территориях может быть связано либо с уменьшением выбросов  $\text{NO}_x$ , либо с изменениями величины трансформации  $\text{NO}_x$  в  $\text{NO}_2$ .

Обширная часть территории Западной Сибири, где происходит добыча нефти, покрыта многочисленными болотами и озерами, выделяющими метан. Таяние вечной мерзлоты в этих районах приводит к дополнительному выделению метана. Здесь происходит интенсивное образование формальдегида и  $\text{NO}$ , что ведет к уменьшению содержания  $\text{NO}_2$  (см. рис. 4 а).

В южных горных районах Сибири и на Урале из-за расширения промышленного производства наблюдается рост концентрации  $\text{NO}_2$  (рис. 4 в).

### **Изменение прозрачности атмосферы**

Одновременно с изменением загрязнения воздуха на территории России отмечено изменение прозрачности атмосферы.

В работах многих исследователей указывалось, что изменения солнечной радиации, обусловленные нестабильностью прозрачности

(мутности) атмосферы, являются существенным фактором изменений климата. Прозрачность атмосферы характеризует ее физическое состояние и непосредственно связана с происходящими в ней процессами, причем не только общесиноптическими, но и формирующимися под влиянием местных условий.

Использование актинометрических данных для анализа прозрачности предполагает расчет специальных характеристик, изменение которых отражает совокупное влияние водяного пара и аэрозолей на ослабление радиации во всей толще атмосферы. Одной из таких характеристик, получивших широкое распространение, является фактор мутности Линке для массы атмосферы  $m = 2$  ( $T_2$ ) (Наставление, 1997), который характеризует отношение коэффициентов ослабления радиации в реальной и идеальной атмосфере при заданном числе оптических масс:

$$T_2 = \frac{\lg P}{\lg P_i} = \frac{\lg S_0 - \lg S_{30}}{\lg S_0 - \lg S_i} = -\frac{\lg P_2}{0,0433},$$

где  $P_i$  и  $P_2$  — коэффициенты прозрачности в идеальной и реальной атмосфере соответственно;  $S_0$  — солнечная постоянная, равная  $1,367 \text{ кВт/м}^2$ ;  $S_i$  — значение прямой солнечной радиации в идеальной атмосфере при массе атмосферы  $m = 2$  по данным Евневича (1994), равное  $1,130 \text{ кВт/м}^2$ ;  $S_{30}$  — измеренное значение прямой солнечной радиации, приведенное к массе атмосферы  $m = 2$ .

Ввиду того что с 1991 г. по настоящее время на земном шаре не происходило мощных вулканических извержений, а проявление последствий извержения вулкана Пинатубо, выразившееся в уменьшении прихода прямой солнечной радиации к земной поверхности, к 1995 г. прекратилось, последнее десятилетие характеризуется достаточно устойчивым состоянием прозрачности атмосферы. При этом с 1994 г. на территории России произошло уменьшение интегральной и аэрозольной мутности атмосферы ((Махоткина и др., 2005; Махоткина и др., 2006; Горбаренко и др., 2006; Плахина и др., 2007). За период с 1994 по 2002—2003 гг. уменьшение  $T_2$  в различных регионах России составило от 8 до 15 % (Махоткина и др., 2005).

Анализ рядов средних годовых значений  $T_2$  для отдельных станций в период 1995—2006 гг. показывает, что прозрачность атмосферы в этот период была выше, чем в два предыдущие десятилетия.



Среднее за последнее десятилетие годовое значение  $T_2$  на всех рассматриваемых станциях оказалось ниже среднего многолетнего значения  $T_2$  за период 1976—1995 гг. Уменьшение  $T_2$  в отдельных случаях достигает 20 %, что свидетельствует о заметном очищении атмосферы в последнее десятилетие и повышении ее прозрачности.

В табл. 2 представлены различия между средними многолетними значениями фактора мутности  $T_2$  для периодов 1976—1995 и 1994—2006 гг., рассчитанные по формуле

$$\Delta T_2 = [(T_2_{1994-2006} - T_2_{1976-1995}) / T_2_{1976-1995}] \cdot 100 \%$$

Таблица 2

**Различия ( $\Delta T_2$ ) между средними многолетними значениями фактора мутности  $T_2$  для периодов 1976—1995 и 1994—2006 гг.**

Регион	Станция	$\Delta T_2$ %
Север ЕЧР	Умба	-13,1
	Архангельск	-2,0
	Коткино	-12,0
	Бугрино	-3,6
Центр ЕЧР	Каменная Степь	-13,2
	Нижнедевицк	-18,4
Урал	Верхнее Дуброво	-5,8
	Памятная	-16,2
Западная Сибирь	Благовещенка	-15,1
	Кузедеево	-14,3
	Гидропартия КАТЭК	-17,9
Восточная Сибирь	Енисейск	-15,6
	Ванавара	-8,9
	Солянка	-20,0
	Ербогачен	-14,5
Забайкалье	Чита	-16,1
Приморье и Сахалин	Хабаровск	-14,2
	Рудная Пристань	-7,1
	Советская Гавань	-15,3
	Тымовское	-14,5
Камчатка	Ключи	0,0
	Корф	-11,9

Несмотря на то что период 1976—2006 гг. в климатическом плане весьма непродолжителен, интересно рассмотреть характерные для него тенденции изменения прозрачности атмосферы.

В конкретных регионах РФ и на отдельных станциях изменения прозрачности имеют весьма специфические черты (рис. 5).

Так, на севере европейской части России (ЕЧР) слабое уменьшение  $T_2$  прослеживается на станциях Умба (Кольский полуостров) и Коткино (материковая часть). На станции Бугрино (остров в Баренцевом море) наблюдается статистически незначимый рост  $T_2$ .

В центральной части ЕЧР на фоне заметных колебаний прозрачности в отдельные годы в целом для рассматриваемого периода линейное приближение указывает на отсутствие тенденций изменения прозрачности либо ее слабое уменьшение (увеличение  $T_2$ ). По данным, представленным на рис. 5 для станции Каменная Степь, в последнее десятилетие  $T_2$  медленно возрастает, однако этот слабый рост происходит на фоне существенного повышения прозрачности после 1994 г.

Аналогичная картина наблюдается и на Среднем Урале. Состояние атмосферы на Среднем Урале может быть охарактеризовано по данным станции Верхнее Дуброво (Екатеринбург) и Памятная. В период 1995—2006 гг. на станции Верхнее Дуброво интегральная мутность очень слабо растет, а на станции Памятная — слабо убывает.

Из-за отсутствия пунктов актинометрических наблюдений в городах Кемерово, Новокузнецк, Барнаул для характеристики региона были использованы данные станций Благовещенка, Кузедеево, Гидропартия КАТЭК, которые дают неоднозначную картину изменений прозрачности. Если по данным станций Благовещенка и Гидропартия КАТЭК наблюдается четко выраженное увеличение прозрачности атмосферы, то на станции Кузедеево  $T_2$  меняется мало.

В Красноярском крае в период 1995—2006 гг. при достаточно высоком уровне прозрачности атмосферы статистически значимые тенденции ее изменения не выявлены (см. рис. 5, станции Енисейск, Ванавара, Ербогачен). Наблюдающиеся отдельные весьма значительные колебания прозрачности могут быть обусловлены местными причинами, в частности лесными пожарами, которые регулярно возникают в регионе расположения станции Ванавара.

Увеличение прозрачности атмосферы и соответственно уменьшение  $T_2$  четко прослеживается на станциях Чита и Хабаровск. На станци-

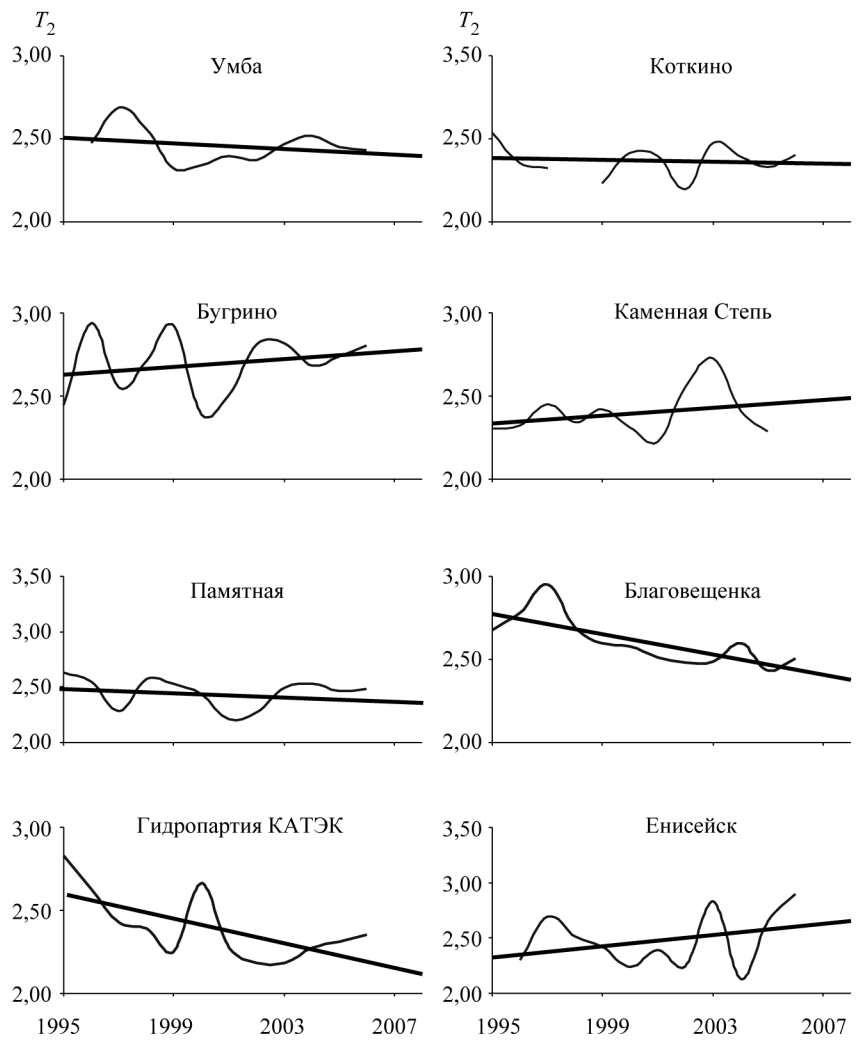
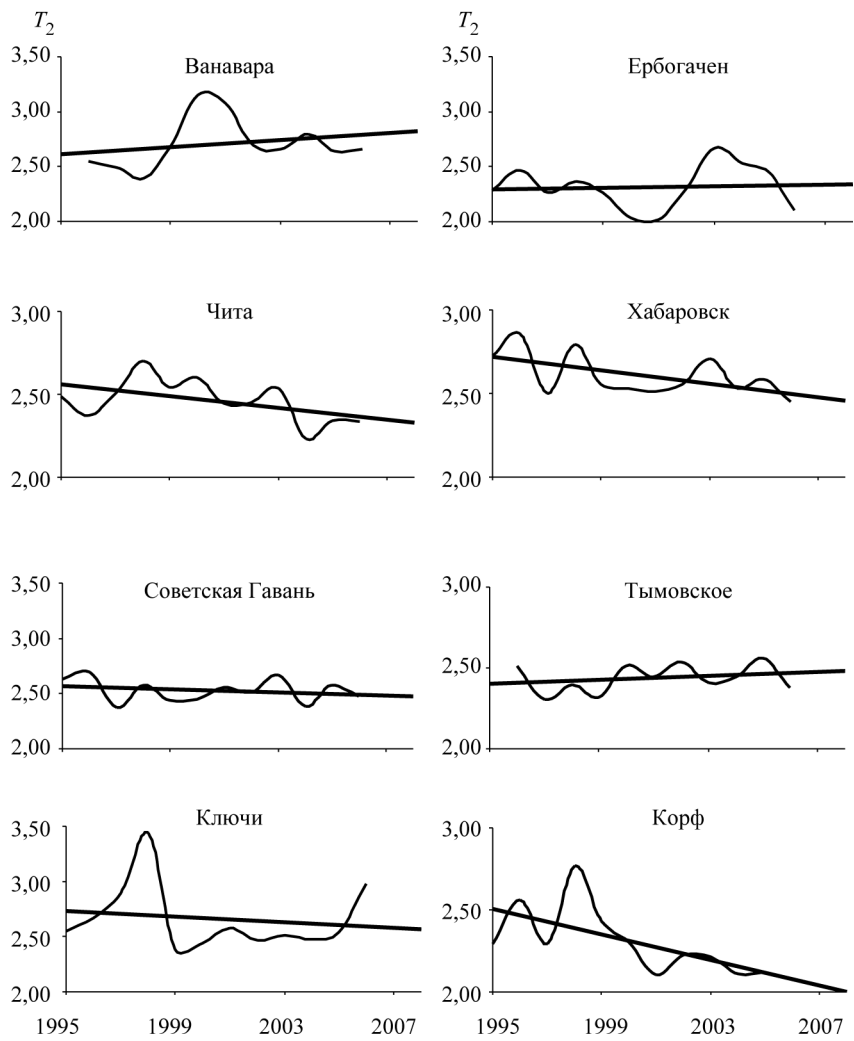


Рис. 5. Изменение фактора мутности  $T_2$  за период 1995—2006 гг.



Продолжение рис. 5.

ях Приморья (Советская Гавань) изменение прозрачности имеет ту же тенденцию, но не столь явно выражено.

На Сахалине (станция Тымовское) наблюдаемые изменения  $T_2$  укладываются в пределах среднего квадратического отклонения, а тенденция изменения статистически не значима.

На Камчатке (станции Ключи и Корф) также наблюдается тенденция уменьшения интегральной мутности атмосферы. Отдельные колебания прозрачности атмосферы на станции Ключи связаны с извержениями вулканов, происходившими в последнее десятилетие, но не имевшими глобальных последствий.

В целом для территории России для последнего десятилетия характерно увеличение прозрачности атмосферы и соответственно уменьшение средних для регионов значений фактора мутности  $T_2$  на 7,5—14 % по отношению к соответствующим средним региональным значениям для периода 1976—1995 гг.

### **Изменения коэффициента перехода $\text{NO}_x$ в $\text{NO}_2$**

В земной атмосфере протекают многочисленные фотохимические процессы, способствующие превращению одних веществ в другие и образованию новых веществ взамен исчезнувших, происходят регулирование и восстановление состава атмосферного воздуха, его очищение. Одним из явных показателей этих процессов является изменение коэффициента трансформации (КТ). КТ представляет собой отношение концентрации диоксида азота к концентрации суммы оксидов азота. Он характеризует способность атмосферы принять заданное количество вещества и с помощью других химических веществ, находящихся в атмосфере, в процессе реакций произвести определенное количество вторичного продукта. Иначе говоря, КТ показывает, какая часть  $\text{NO}_x$ , поступившего в атмосферу, преобразуется в новое вещество ( $\text{NO}_2$ ) за время, в течение которого будут проходить фотохимические реакции. Таким образом, КТ не только является коэффициентом для расчета выбросов  $\text{NO}_2$ , но «сообщает» важные сведения о реактивной природе атмосферного воздуха в данном месте. Эта химическая активность определяется множеством факторов, таких как количественный и качественный состав воздуха, местные метеорологические условия, определяющие очищение его при переносе и рассеянии, вымывание

Таблица 3

Изменения средних концентраций оксида и диоксида азота, мкг/м<sup>3</sup>

Город	1997		2006		$\frac{\Delta[\text{NO}_2]}{[\text{NO}_2]}$	$\frac{\Delta[\text{NO}]}{[\text{NO}]}$
	[NO <sub>2</sub> ]	[NO]	[NO <sub>2</sub> ]	[NO]	[NO <sub>2</sub> ]	[NO]
Барнаул	52	27	95	20	0,83	-0,26
Владивосток	104	70	68	50	-0,35	-0,29
Великий Новгород	42	22	41**	46**	0,02	1,0
Калуга	25	19	64	31	1,56	0,63
Кемерово	48	35	95	20	-0,98	-0,43
Нерюнгри	76	62	72	17	-0,05	-0,72
Новокузнецк	40	23	32	11	-0,20	-0,52
Норильск*	24	22	37	86	0,54	2,91
Серпухов	52	60	42	23	-0,19	-0,38
Старый Оскол	41	29	37	16	-0,09	-0,45
Хабаровск	78	84	63	31	-0,19	-0,63
Ханты-Мансийск	31	30	29	16	-0,06	-0,46
Челябинск	21	24	40	10	-0,9	-0,58
Череповец	35	22	22	20	-0,37	-0,09
Чита	65	53	61	42	-0,06	-0,21
Южно-Сахалинск	152	175	86	57	-0,43	-0,67
Москва	76	72	55	72	-0,28	0,0
Санкт-Петербург	68	46	54	34	-0,20	-0,26

\* Данные за 2003 г.

\*\* Данные за 2005 г.

примесей осадками, а также ускорение или замедление реакций за счет изменения температуры воздуха и количества приходящей солнечной радиации.

Для изучения изменений КТ были использованы данные наблюдений за концентрацией оксида и диоксида азота за 1997—2006 гг., полученные в городах различных регионов России по методике, изложенной в работе Безуглой и Смирновой (2008). Для обеспечения однородности исходных данных выбирались города, где в течение всего

периода имелись данные о концентрациях оксида и диоксида азота, полученные на одних и тех же станциях. Для устранения неопределенностей в расчетах в анализ были включены города, в которых концентрации оксида и диоксида азота превышали  $10 \text{ мкг/м}^3$ . Это сократило объем исходной выборки, и при анализе пришлось использовать данные не только не очень крупных, но и крупных городов. Всего было отобрано 19 городов, которые охватывали практически все регионы России.

Анализ концентраций оксида и диоксида азота в рассматриваемых городах России (табл. 3) показывает, что их средние значения изменялись в широком диапазоне. За 10 лет концентрация  $\text{NO}_2$  понизилась во всех городах, кроме Великого Новгорода, Калуги и Норильска. Концентрации  $\text{NO}$  также в основном понижались. Однако изменения концентраций  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  происходили с различной скоростью.

По данным о концентрациях  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  рассчитывались средние за месяц значения КТ, ход которых во времени (за 120 месяцев) представлен на рис. 6.

Результаты, полученные для большинства рассматриваемых городов, указывают на то, что в последние годы происходит увеличение значений коэффициента трансформации (КТ). Ранее в работе Безуглой и Смирновой (2008) такой вывод был получен по данным трех станций города Липецка за период 1996—2001 гг.

В большинстве городов увеличение КТ составило 11—25 % от исходного значения (январь 1997 г.), в Ханты-Мансийске и Старом Осколе оно достигло 45 %, а в Нерюнгри и Хабаровске — 60—66 % (табл. 4).

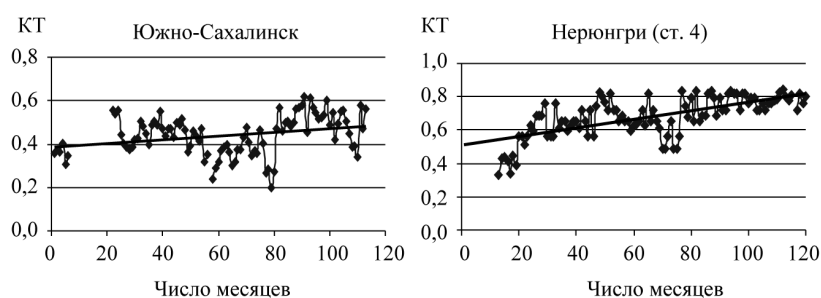
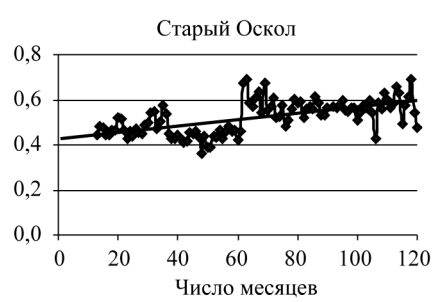
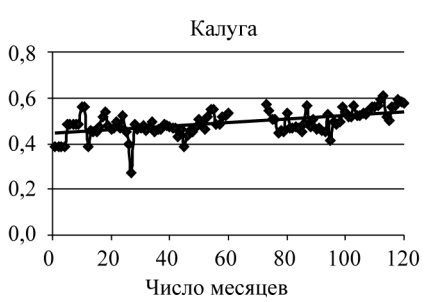
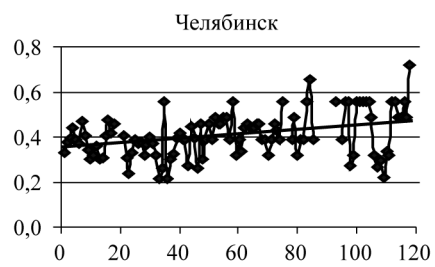
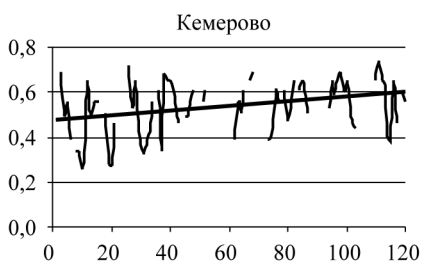
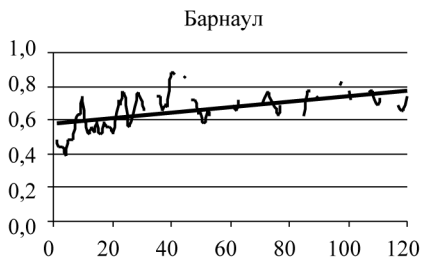
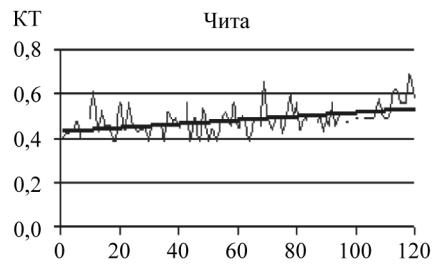
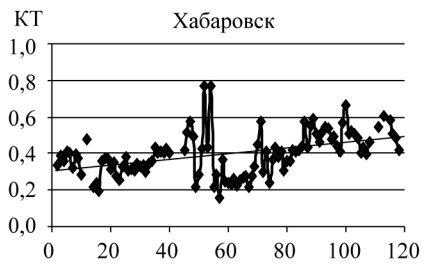
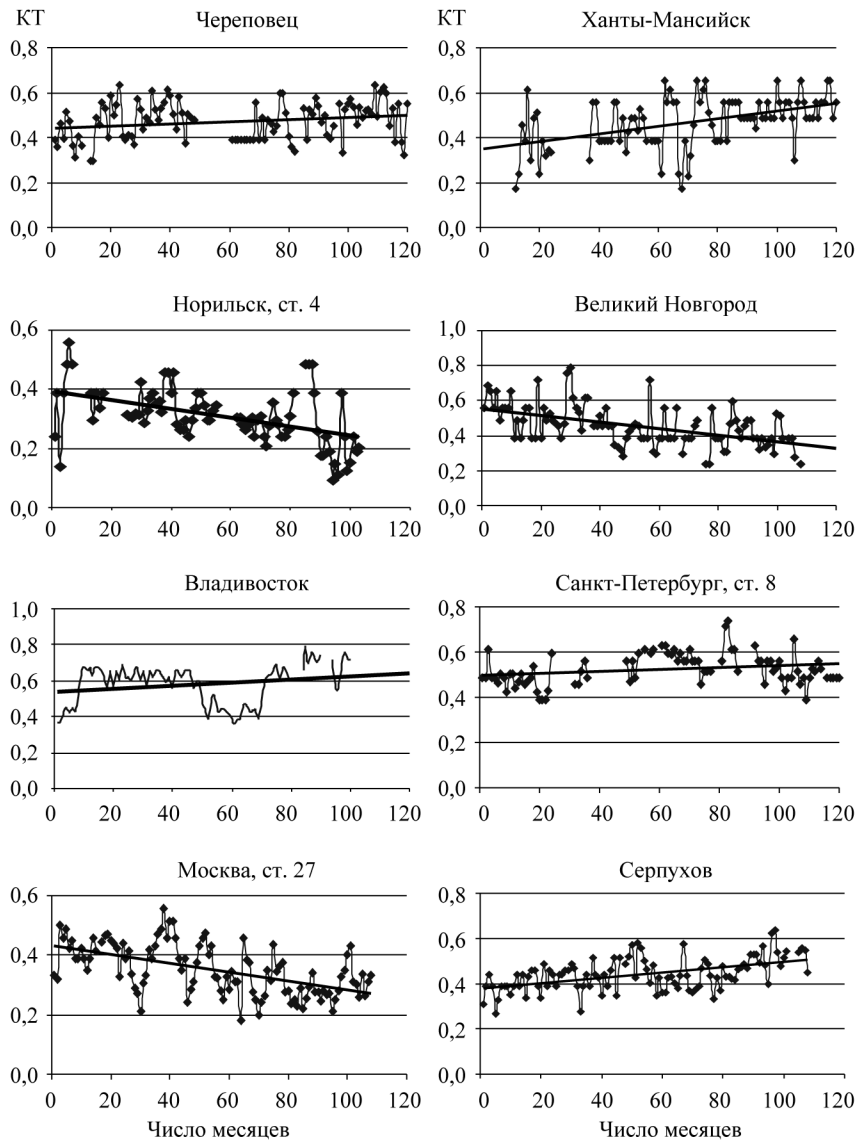


Рис. 6. Тенденции изменения КТ в городах России.



Продолжение рис. 6.





Продолжение рис. 6.

Этот результат указывает на то, что одновременно с процессами глобального потепления в атмосфере происходит усиление окислительно-восстановительных реакций, способствующих ее очищению.

Таблица 4

**Изменения КТ (% за 10 лет) за период 1997—2006 гг.**

Город	КТ	Город	КТ
Барнаул	30	Старый Оскол	25
Владивосток	16	Хабаровск	60
Великий Новгород	-33	Ханты-Мансийск	64
Калуга	23	Челябинск	38
Кемерово	25	Череповец	11
Нерюнгри	66	Чита	30
Новокузнецк	16	Южно-Сахалинск	25
Норильск	-48	Москва, ст. 27	-35
Серпухов	35	Санкт-Петербург	10

Об увеличении КТ свидетельствуют также данные об изменении среднего по России коэффициента трансформации оксидов азота в диоксид (рис. 7). В целом по городам России за рассматриваемый период КТ увеличился на 14 %.

Увеличение КТ отмечено во всех городах, кроме Норильска, Великого Новгорода, Петропавловска-Камчатского, а также крупнейшего города России Москвы. В Великом Новгороде, Норильске и Москве значения КТ самые низкие (0,26—0,32).

В Норильске с 2000 г. наблюдается значительное увеличение выбросов оксида азота, указывающее на увеличение концентрации этого вещества. В 2003 г. по сравнению с 1997 г. средняя концентрация оксида азота возросла почти в три раза. В результате атмосфера, по-видимому, не в состоянии «переработать» возросший объем выбросов, и КТ уменьшился на 37 %. По данным Ханты-Мансийска, расположенного южнее Норильска, значения КТ возрастают (см. рис. 6).

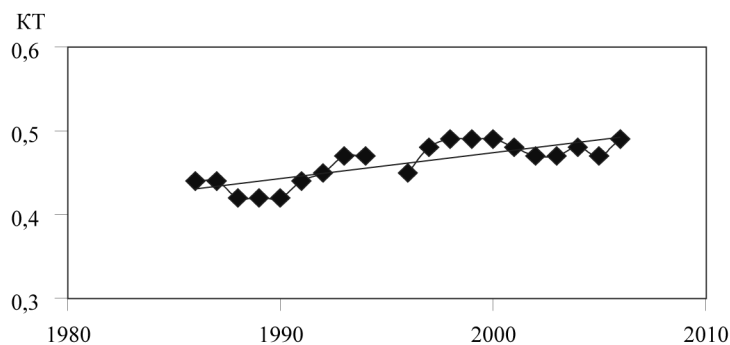


Рис. 7. Средние значения коэффициента трансформации за двадцать лет по городам России.

В Великом Новгороде, где наблюдается снижение КТ, в последние годы отмечен рост промышленного производства и увеличение концентрации оксидов азота в полтора раза.

В Москве концентрация  $\text{NO}_2$  понизилась, а концентрация  $\text{NO}$  не изменилась. В Московской области (в Серпухове) также наблюдается рост КТ, что указывает на противоречие в Москве общим закономерностям роста КТ.

В Петропавловске-Камчатском с середины 2001 г. значения КТ резко снизились. Это связано с началом деятельности камчатских вулканов. В 2002 г. зафиксирована очень активная деятельность вулканов Ключевской, Карымский, Безымянный и Шивелуч. Выбросы пепла достигали высоты 5,5 км. Активность вулканов сопровождалась увеличением естественных выбросов оксида азота, что и проявилось в данных наблюдений в Петропавловске-Камчатском. Поэтому результаты наблюдений в Петропавловске-Камчатском не использованы при рассмотрении как тенденции изменения оксидов азота от городских источников, так и тенденции изменения КТ. Однако если анализировать данные лишь за последние пять лет, то можно заметить, что в этот период и здесь КТ увеличивается (рис. 8).

Подтверждением увеличения интенсивности фотохимических реакций в атмосфере служат не только данные о КТ, но и сведения об изменениях в течение десятилетнего периода концентрации формальде-

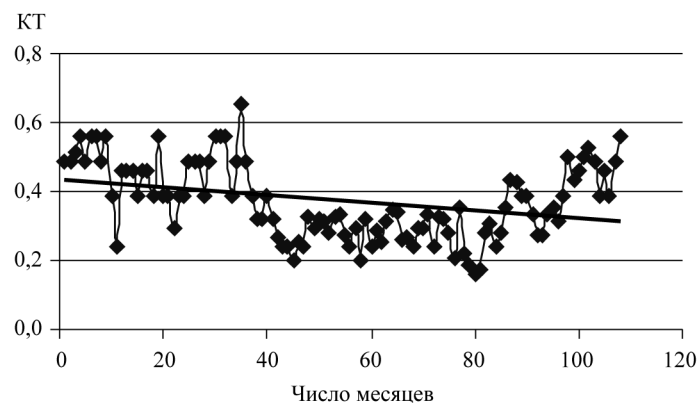


Рис. 8. Тенденция изменения КТ в Петропавловске-Камчатском.

гида. По сравнению с 1997 г. число городов, где средняя концентрация формальдегида превысила ПДК увеличилось на 25 % (см. рис. 1).

Увеличение коэффициента трансформации свидетельствует о повышении общей химической активности атмосферы, что влечет за собой появление формальдегида и других примесей, участвующих в реакциях. В процессе реакций (5) и (7) происходит уменьшение концентрации диоксида азота за счет увеличения концентрации NO и образование формальдегида за счет метана.

В целом данные для рассматриваемых городов достаточно надежно свидетельствуют об общем характере увеличения КТ в России.

На рис. 9 представлена связь между концентрациями NO<sub>2</sub> и NO и значениями КТ (цифры у точек) по данным за 12 месяцев для 19 городов за 1997 и 2006 гг. Коэффициент корреляции равен 0,60. Связь прослеживается довольно четкая, но разброс точек связан с убыванием значений КТ с правой нижней части рисунка в зависимости от роста концентрации NO. Низкие значения КТ (Норильск и Москва) наблюдаются при максимальных значениях концентрации NO и сравнительно невысоких значениях концентрации NO<sub>2</sub>. Это указывает на то, что при высоких концентрациях NO лишь часть его может за счет окисления преобразоваться в NO<sub>2</sub>. Самые высокие значения КТ (0,8) отмечены при концентрации NO менее 20 млн<sup>-1</sup>.

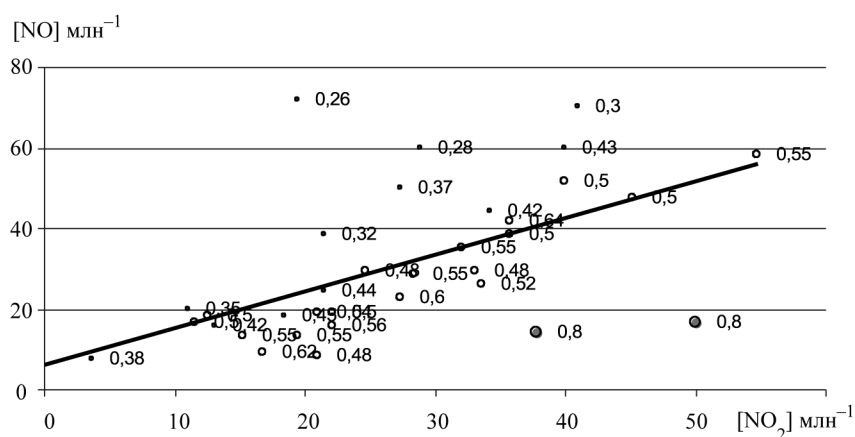


Рис. 9. Связь концентраций NO<sub>2</sub> и NO и значений КТ (цифры у точек) по данным за 12 месяцев для 19 городов за 1997 и 2006 гг.

### Заключение

В результате анализа обширной информации о состоянии атмосферы в последние годы можно сделать следующие выводы.

1. Обнаружена зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха, которая может свидетельствовать о повышении химической активности атмосферы при повышении температуры.

2. На территории России происходит уменьшение концентраций большинства веществ. Особенно заметно оно в Приамурье и Приморье, а также в Прибайкалье и Забайкалье, где повышение температуры воздуха за десять лет составило 1,2 °С.

3. По данным большинства актинометрических станций в последнее десятилетие на территории России выявлено увеличение прозрачности атмосферы, особенно четко проявившееся в Забайкалье и на Дальнем Востоке.

4. Результаты наблюдений за концентрациями оксида и диоксида азота в 19 городах России показали, что в период с 1997 по 2006 г. произошло увеличение химической активности в связи с повышением температуры приземного слоя воздуха. Коэффициент трансформации суммы оксидов азота в диоксид азота увеличился почти во всех городах,

кроме Великого Новгорода, Норильска и Москвы. Увеличение среднего значения КТ по стране составило 14 %, по рассматриваемым городам оно составило 20 %, изменяясь от 11 % в Череповце и Санкт-Петербурге до 66 % в Хабаровске и Нерюнгри.

5. Установлена четкая зависимость между концентрацией оксидов азота и коэффициентом трансформации, который понижается от 0,8 при концентрации оксида азота менее 20 мкг/м<sup>3</sup> до 0,28 при концентрации более 80 мкг/м<sup>3</sup>.

6. Установлено, что при концентрации NO менее 20 млн<sup>-1</sup> происходит активное окисление его до NO<sub>2</sub>, а при концентрации NO более 60 млн<sup>-1</sup> реакции значительно ослабевают. Объяснить этот факт можно, лишь предполагая, что при таких концентрациях нарушается химическое равновесие и в атмосфере не может продолжаться процесс окисления.

7. Трудно однозначно решить, к каким последствиям может привести увеличение химической активности атмосферы, однако понятно, что оно будет способствовать уменьшению загрязнения атмосферы даже при непрерывном увеличении промышленных выбросов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В., 2008. Воздух городов и его изменения. — СПб: Астерон. — 253 с.
- Горбаренко Е. В., Ерохина А. Е., Лукин А. Б., 2006. Многолетние изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в России. — Метеорология и гидрология, № 7, с. 41—48.
- Ежегодник выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2006 год, 2007. / Под ред. К. Б. Миляева, М. В. Волкодаевой. — СПб, изд. ФГУП «Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха». — 319 с.
- Евневич Т. В., 1994. О расчете солнечной радиации и естественной освещенности в идеальной атмосфере. — Метеорология и гидрология, № 2, с. 41—48.
- Махоткина Е. Л., Плахина И. Н., Лукин А. Б., 2005. Некоторые особенности изменения мутности на территории России в последней четверти XX века. — Метеорология и гидрология, № 1, с. 28—36.
- Махоткина Е. Л., Плахина И. Н., Лукин А. Б., Панкратова Н. В., 2006. Анализ годового хода и межгодовой изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над территорией России. — Исследования Земли из космоса, № 5, с. 63—71.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 5, часть 1. Актиметрические наблюдения. — М.: Гидрометеиздат, 1997, 254 с.

Обзор, 2007. Загрязнение природной среды в Российской Федерации за 2006 г. — М.: Изд. Росгидромета. — 162 с.

Плахина И. Н., Махоткина Е. Л., Панкратова Н. В., 2007. Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России в 1976—2003 гг. Метеорология и гидрология, № 2, с. 19—29.

Тенденции и динамика загрязнения природной среды Российской Федерации на рубеже XX—XXI веков, 2007. — М.: Изд. Росгидромета. — 64 с.

Bousquet P. et al., 2006. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. Letter. — Nature, V. 443/28, p. 439—442.

Seinfeld T. H., Pandis S. N., 1997. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. — Wiley and Sons. — 1360 p.

УДК 551.510.42

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО  
РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ДИФФУЗИИ  
ТЯЖЕЛОЙ ПРИМЕСИ**

*Р. И. Оникул, Е. А. Яковлева*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

*На основе аппроксимации численного решения уравнения атмосферной диффузии разработана обобщенная формула для расчета приземной концентрации тяжелой примеси в воздухе. При постановке задачи использовались более общие по сравнению с использованными при известном решении Гандина—Соловейчика и Раундса аппроксимации для распределений по высоте скорости ветра  $u_z$  и вертикальной составляющей коэффициента турбулентной диффузии  $k_z$ . Даны рекомендации по использованию этой формулы при расчетах загрязнения воздуха и подстилающей поверхности полидисперсной пылью от промышленных и природных наземных площадных источников.*

**ANALYTICAL APPROXIMATION OF NUMERICAL  
SOLUTION OF ATMOSPHERIC DIFFUSION EQUATION FOR  
DUST PARTICLES**

*R.I. Onikul, E.A. Yakovleva*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*On the basis of approximation of numerical solution of atmospheric diffusion equation generalized formula for the calculation of dust particles ground concentration was developed. When stating the problem the more general approximations for the vertical distributions of wind speed  $u_z$  and eddy diffusivity  $k_z$  were used in comparison with those used for the well-known solution by Gandin—Solovejchik and Rounds. Recommendations on the use of this formula for the calculation of air and ground surface pollution by polydisperse dust from the industrial and natural ground-based area sources are given.*



Задача развития методов расчета загрязнения воздуха и подстилающей поверхности пылью, выносимой ветром с участков размещения пылевидных материалов (ПМ), имеет важное научное и практическое значение. Объекты, с поверхности которых при определенных условиях происходит интенсивный ветровой вынос ПМ за их пределы, далее называемые пылящими источниками, — это такие промышленные наземные площадные источники, как участки хранения пылевидных сырья, топлива, строительных материалов, продукции, производственных отходов (золы, шлака и др.) и многие другие. Площади таких источников изменяются от десятков квадратных метров до десятков квадратных километров.

К особенностям пылящих источников относится возможность быстрого увеличения при усилении ветра их мощности, которая существенно зависит от адгезийных свойств их поверхностных слоев, определяемых плотностью, формой и дисперсностью частиц, насыпной плотностью и влажностью ПМ, наличием поверхностной корки и др. Влажность ПМ и наличие поверхностной корки могут определяться предшествующими погодными условиями, и прежде всего режимом солнечной радиации, температуры воздуха и осадков. Ограниченные по площади участки расположения ПМ (песка или др.) часто встречаются и в природных условиях (например, так называемые пляжи на побережье водных объектов (Оникул, Яковлева, 2001)).

В данной работе излагается методология получения аналитической формулы, аппроксимирующей численное решение уравнения атмосферной диффузии тяжелой примеси. Ее применение позволяет с использованием принципа суперпозиции проводить расчеты загрязнения воздуха и подстилающей поверхности полидисперсной пылью от локальных наземных площадных источников. При этом площадные источники в общем случае аппроксимируются совокупностью виртуальных точечных источников. Концентрация  $q$  от точечного источника определяется на основе решения трехмерного уравнения атмосферной диффузии тяжелой примеси:

$$u_z \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y}. \quad (1)$$

Здесь координатные оси  $x$  и  $y$  направлены соответственно вдоль и поперек ветра, ось  $z$  — вертикально вверх. Начало координат располагается

в проекции источника на подстилающую поверхность ( $z = 0$ );  $u_z$ ,  $k_z$  и  $k_y$  — распределения по  $z$  скорости ветра, вертикальной и горизонтальной составляющих коэффициента турбулентной диффузии.

В работе Берлянда (1975) показано, что при различных высоте источника  $H$ , граничных условиях и аппроксимации  $u_z$ ,  $k_z$ ,  $k_y$  и учете так называемого эффекта осреднения справедлива формула:

$$q = \frac{q'}{2\sqrt{\pi\tilde{K}_0x}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\varphi_0^2x^2}\right), \quad (2)$$

где  $q'$  — решение уравнения атмосферной диффузии для ориентированного поперек ветра линейного источника бесконечной длины при тех же  $H$ ,  $u_z$ ,  $k_z$  и граничных условиях, которое имеет следующий вид:

$$u_z \frac{\partial q'}{\partial x} - w \frac{\partial q'}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q'}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\tilde{K}_0 = k_0 + \frac{x\varphi_0^2}{2}, \quad (4)$$

где  $k_0 \approx 0,5 \dots 1$  м,  $\varphi_0$  — среднее квадратическое отклонение направления ветра за период  $T$  осреднения концентрации  $q$ .

При  $x = 0$  условие задается в следующем виде:

$$q' = \frac{M'}{u_z} \delta(z - H), \quad (5)$$

где  $M'$  — мощность источника,  $\delta(\zeta)$  — дельта-функция Дирака. Естественное верхнее граничное условие при решении уравнения (3) имеет следующий вид:

$$\text{при } z \rightarrow \infty: \quad q' \rightarrow 0. \quad (6)$$

При формулировке нижнего граничного условия (при  $z = 0$ ) и выборе аппроксимаций для  $u_z$  и  $k_z$  учитывалось, что решение уравнения (1) в данной работе находится с целью его использования для площадных пылящих источников.

Рассмотрим некоторые полученные ранее аналитические решения уравнения атмосферной диффузии тяжелой примеси при различных условиях на нижней границе  $z_H$  расчетной области и аппроксима-

циях  $u_z$  и  $k_z$ . В работе Мони́на (1962) это решение получено при весьма общем условии при  $z = z_H$  ( $0 \leq z_H < H$ ), но без учета зависимости  $u_z$  и  $k_z$  от  $z$ . Получив аналитические решения при этом условии, можно найти частные решения для различных условий при  $z = z_H$ : полного или частичного поглощения атмосферной примеси подстилающей поверхностью, ее так называемого сухого осаждения и отражения.

В работе Бызово́й, Нестерова (1988) на основе результатов А. Ф. Дунского с использованием предложенного А. С. Мониным нижнего граничного условия получено асимптотическое (для больших  $x$ ) решение (3), (5), (6) для  $q'|_{z=0}$ . Асимптотические решения используются, прежде всего, при изучении мезомасштабного и дальнего переноса радиоактивных аэрозолей. При таких пространственных масштабах существен учет сухого осаждения аэрозолей и их вторичного выноса (ресуспензии) в воздух после выпадения. Для рассматриваемой в данной работе задачи, когда пространственный масштаб расчетной области не превышает нескольких километров, использование асимптотических решений неэффективно, а учет сухого осаждения и ресуспензии несуществен.

В работе Раундса (Rounds, 1955) и независимо в работе Гандина, Соловейчика (1958) получено точное аналитическое решение (3), (5), (6) при следующих нижнем граничном условии и аппроксимации  $u_z$  и  $k_z$ :

$$\text{при } z=0: \quad k_z \frac{\partial q'}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

$$u_z = u_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^n, \quad k_z = k_1 \left( \frac{z}{z_1} \right). \quad (8)$$

Здесь и далее единичная высота  $z_1 = 1$  м.

Это решение удобно для практического применения для источников с  $H > 0$ . Его нельзя использовать для наземных источников ( $H = 0$ ), что обусловлено преобладанием в данной постановке у подстилающей поверхности гравитационного оседания частиц над их турбулентным выносом. Это позволяет рассматривать условие (7) для тяжелой примеси при  $H > 0$  как достаточно точное.

Из полученного в работах Гандина, Соловейчика (1958) и Раундса (Rounds, 1955) решения следует формула для приземной концентрации  $q'|_{z=0}$ :

$$q'|_{z=0} = q'_m S' \left( \frac{x}{x'_m} \right), \quad (9)$$

где

$$q'_m = \frac{M'(1+n)(1+\lambda)^{1+\lambda} \exp[-(1+\lambda)]}{u_1 \Gamma(1+\lambda) H^{(1+n)}}, \quad (10)$$

$$S' = \left( \frac{x'_m}{x} \right)^{1+\lambda} \exp[(1+\lambda)(1-x'_m/x)], \quad (11)$$

$$x'_m = \frac{u_1 H^{1+n}}{k_1 (1+n)^2} \frac{1}{1+\lambda}, \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{w}{(1+n)k_1}, \quad (13)$$

$q'_m$  — максимальное значение  $q'|_{z=0}$ , которое достигается на расстоянии  $x'_m$  от источника;  $S'$  — безразмерная функция, характеризующая зависимость  $q'|_{z=0}$  от  $x$ .

Формулу (9) можно получить, используя предложенную в работе Берлянда (1975) замену переменных, из полученного М. Е. Берляндом в 1946 г. решения (3), (5)—(8) для легкой ( $w = 0$ ) примеси.

В данной работе решение (3) при граничных условиях (5)—(7), так же как и в ряде других выполнявшихся в ГГО работ (см., например, работу Берлянда (1975)), было получено с использованием логарифмического распределения  $u_z$  (14) и предложенной М. И. Юдиным и М. Е. Швецом схемы «с изломом» для  $k_z$  (15):

$$u_z = u_1 \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_1/z_0)}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{при } z \leq h: \quad k_z &= v + k_1 \frac{z}{z_1}, \\ \text{при } z > h: \quad k_z &= v + k_1 \frac{h}{z_1}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $z_0$  — параметр шероховатости подстилающей поверхности,  $h$  — высота приземного слоя атмосферы,  $\nu$  — коэффициент молекулярной диффузии для воздуха.

В работе Баренблатта (1982) показано, что и в насыщенном пылью воздушном потоке сохраняется логарифмический профиль  $u_z$ , но с несколько измененными по сравнению со свободным от пыли воздушным потоком значением  $z_0$ . Однако при практических расчетах для различных ПМ учесть этот эффект, так же как и изменчивость  $z_0$ , пока затруднительно. Излагаемые далее результаты базируются на численном решении при  $z_0 = 0,01$  м.

Рассмотрим некоторые решения для наземного пылящего источника в виде ориентированной поперек ветра (оси  $x$ ) полосы шириной  $l$  бесконечной протяженности вдоль оси  $y$  (далее источника в виде полосы). Для такого источника были получены аналитические решения уравнения атмосферной диффузии примеси (Гаврилов, Горматюк, 1989; Оникул, Хуршудян, 1983 и др.). Отметим некоторые общие подходы в указанных работах при формулировании условия при  $z = z_H$ , а именно использование при  $z = z_H$  различных условий при  $x \leq l$  и  $x > l$  ( $x = 0$  соответствует наветренному краю источника), а также учет мощности источника ее включением в нижнее граничное условие при  $x \leq l$  в виде полагающегося известным турбулентного потока частиц  $P_T$ . В зависимости от целевого назначения моделей, в том числе от пространственного масштаба расчетной области, условия при  $x = 0$  и при  $z = z_H$  могли существенно различаться. В большинстве аналитических решений для  $u_z$  и  $k_z$  использовались аппроксимации (8).

Аналитические формулы для расчета концентрации при  $x > l$  от источников в виде полосы весьма сложны и неудобны для практического применения. Некоторые решения можно использовать только на достаточно большом удалении от источника. Предположение об обусловленности турбулентностью выноса в воздух тяжелой примеси, обычно полидисперсной, характеризующейся широким диапазоном изменения  $w$ , вызывает существенные возражения. В действительности процесс пыления подстилающей поверхности существенно сложнее. Многочисленные экспериментальные исследования в природных условиях и аэродинамических трубах (Бютнер, 1978; Оникул, Яковлева, 2001; Фукс, 1955) показали, что существенный и, по-видимому, основной вклад дает механический вынос частиц в воздух. Он обуслов-

лен выбиванием с поверхности источника мелких частиц более крупными сальтирующими частицами и подъемной силой. Иногда нетурбулентный поток частиц наряду с турбулентным включался в нижнее граничное условие (Гаврилов, Горматюк, 1989; Махонько, 1984).

Содержательный анализ различных вариантов формулировки граничного условия при  $z = z_n$  выполнен в работах Буйкова (1990, 1992). В двухфазном пылевоздушном потоке он выделил приповерхностный слой высотой  $h_m$ , в котором преобладает механическое движение частиц, а турбулентным их перемещением можно пренебречь. При  $z > h_m$  Буйков предложил учитывать турбулентную диффузию частиц обычным образом. Значения  $h_m$  и механического потока частиц в приповерхностном слое определяются по экспериментальным данным. Высота  $h_m$  начального выноса частиц в воздух практически не связана с характеристиками атмосферной турбулентности. Это позволило в данной работе использовать решение задачи, интерпретируя  $H$  как осредненное по источнику значение  $h_m$ . Использование условия (7) при всех значениях  $x$  позволяет применять полученное решение на основе принципа суперпозиции для площадного источника произвольной формы, причём как непосредственно на нем, так и за его пределами.

В данной работе задача решалась численно с использованием приведенной в работе Берлянда (1975) формулы

$$h = \frac{0,1}{z_1 \omega_z} k_1, \quad (16)$$

где  $\omega_z = 2\omega \sin \varphi$ ;  $\omega = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  — угловая скорость вращения Земли;  $\varphi$  — географическая широта, которая при расчетах принималась равной  $50^\circ$ .

Так же как и в ряде ранее выполнявшихся в ГГО работ (Берлянд, 1975; Оникул, 1961), численное решение находилось методом прогонки на регулярной сетке точек с шагом  $\Delta x$  и  $\Delta z$  по осям  $x$  и  $z$  ( $\Delta z = H/N$ , где  $N$  — целое число) с использованием при аппроксимации  $k_z \frac{\partial q'}{\partial z}$  эффективных коэффициентов атмосферной диффузии и определением на каждом шаге по  $x$  верхней границы расчетной области по коэффициентам прямой прогонки.

Начальное условие (5) представлялось в следующем виде:

$$\text{при } x = 0, z = H: q' = \frac{M'}{u_z|_{z=H} \Delta z}, \quad (17)$$

$$\text{при } x = 0, z \neq H: q' = 0. \quad (18)$$

При расчетах принималось  $M' = 1 \text{ г}/(\text{м} \cdot \text{с})$ .

Контроль точности численного решения проводился на основе сопоставления его результатов с расчетами по аналитическим решениям и проверке сохранения с погрешностью  $\varepsilon$  ( $\varepsilon \ll 1$ ) суммы масс частиц, выпавших на подстилающую поверхность и переносимых воздушным потоком.

Заметное пыление на источниках начинается при динамической скорости  $V_*$ , превышающей ее критическое значение  $V_{*кр}$  (Оникул, Яковлева, 2001, 2002). При таких условиях стратификация приземного слоя атмосферы близка к равновесной. Это позволило рассчитывать  $k_1$  по следующей формуле:

$$k_1 = \frac{\kappa^2 u_1 z_1}{\ln(z_1/z_0)}, \quad (19)$$

где  $\kappa$  — постоянная Кармана.

При обработке результатов расчетов использовалась скорость ветра на стандартном уровне флюгера  $z_\phi = 10 \text{ м}$ :  $u = u_z|_{z=z_\phi} = 1,5u_1$  (при  $z_0 = 0,01 \text{ м}$ ).

Расчеты проводились для всех сочетаний определяющих параметров в следующих диапазонах их изменения:  $\tilde{H} = H/z_1 = 0,1 \dots 10$ ;  $u = 3 \dots 22,5 \text{ м/с}$ ;  $w = 0 \dots 0,35 \text{ м/с}$  для значений расстояния  $x$  в диапазоне  $0,1 \text{ — } 4000 \text{ м}$ .

Основной целью обработки результатов численного решения было получение удобной для практического применения аппроксимационной аналитической формулы, позволяющей рассчитать для тяжелой примеси пространственные распределения приземной концентрации, плотности выпадения частиц на подстилающую поверхность и их горизонтальных потоков. В качестве исходной использовалась формула (9).

Аппроксимационные формулы для  $q'_m$  и  $x'_m$  имеют следующий вид:

$$q'_m = \alpha_1 \alpha_3 q'_{ma}, \quad (20)$$

$$x'_m = \alpha_2 \alpha_4 x'_{ma}, \quad (21)$$

где  $q'_{ma}$  и  $x'_{ma}$  — значения  $q'_m$  и  $x'_m$ , рассчитанные по формулам (10) и (12). Значения безразмерных величин  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  для каждого расчетного варианта определяются по следующим формулам:

$$\alpha_1 = \left( \frac{q'_m}{q'_{ma}} \right) \Big|_{w=0}, \quad \alpha_2 = \left( \frac{x'_m}{x'_{ma}} \right) \Big|_{w=0}, \quad (22)$$

$$\alpha_3 = \frac{q'_m}{q'_{ma}} \frac{1}{\alpha_1}, \quad \alpha_4 = \frac{x'_m}{x'_{ma}} \frac{1}{\alpha_2}. \quad (23)$$

Для установления входящего в формулы (10), (12) и (13) параметра  $n$  рассматривались три варианта:  $n = 0,15$  для всех  $\tilde{H}$ ;  $n$ , при котором совпадают значения  $u_z|_{z=H}$ , рассчитанные по формулам (8) и (14);  $n$ , при котором совпадают средние значения скорости ветра под источником, рассчитанные по формулам (8) и (14). Оптимальным оказался третий вариант определения  $n$ , минимизирующий различия между  $q'_m$  и  $q'_{ma}$ ,  $x'_m$  и  $x'_{ma}$ . Зависимость соответствующих этому варианту значений  $n$  от  $\tilde{H}$  (табл. 1) была использована при дальнейших расчетах.

Таблица 1

$\tilde{H}$ . . . . .	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8—1	10
$n$ . . . . .	0,377	0,328	0,307	0,295	0,287	0,282	0,278	0,274	0,18

Отметим, что определение параметра  $n$  по средней скорости ветра в слое  $z \leq H$  неоднократно использовалось при сопоставлении результатов расчетов по математическим диффузионным моделям с данными натуральных экспериментов, в которых тяжелая примесь выбрасывалась в атмосферу из высоких источников (см., например, работы Бызовой, Оникула (1965), Дунского и др. (1968)).

Безразмерные коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  рассчитываются по аппроксимационным формулам:

$$\alpha_1 = 1,021 \tilde{H}^{-0,0126}; \quad \alpha_2 = 1,11 \exp(-0,171/\tilde{H}^{0,4}). \quad (24)$$

Результаты расчетов коэффициентов  $\alpha_3, \alpha_4$  для всех сочетаний определяющих параметров приведены на рис. 1 и 2. Из этих рисунков видно, что по мере уменьшения  $\tilde{w}$  и увеличения  $\tilde{H}$  коэффициенты  $\alpha_3$  и  $\alpha_4$  приближаются к единице.



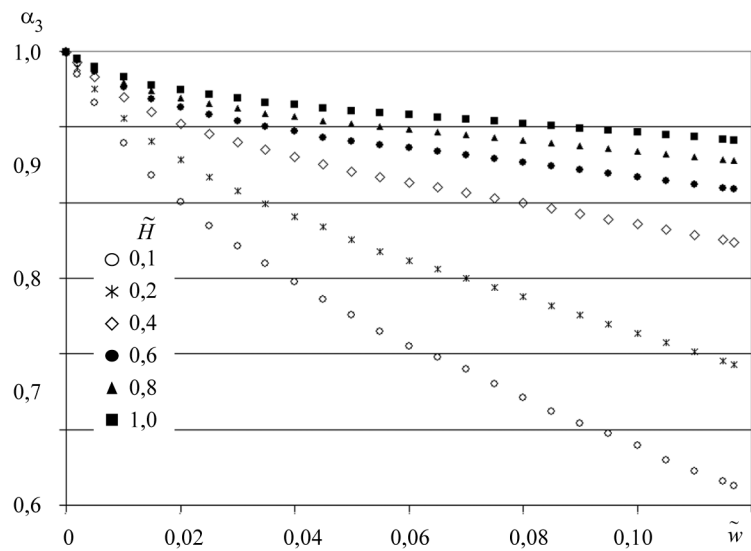


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $\alpha_3$  от  $\tilde{H}$  и  $\tilde{w}$ .

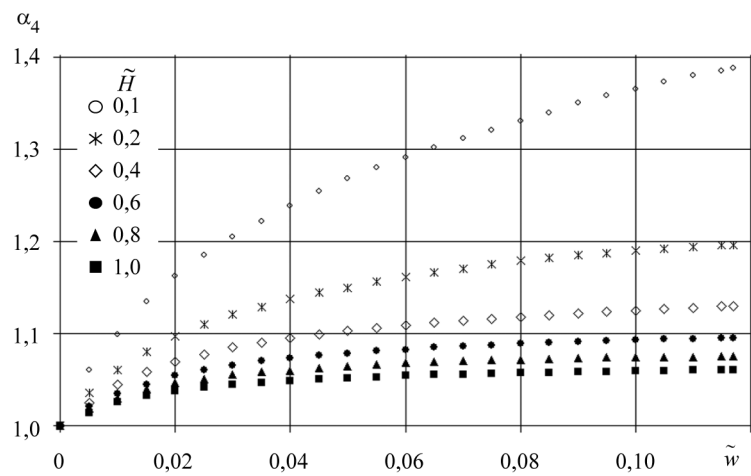


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $\alpha_4$  от  $\tilde{H}$  и  $\tilde{w}$ .

Безразмерную функцию  $S'$  предлагается рассчитывать по формуле (11), определяя  $x'_m$  по формуле (21). Из рис. 3 видно удовлетворительное согласование определенных указанным образом значений  $S'$  и рассчитанных при численном решении значений  $\frac{q'|_{z=0}}{q'_m}$  во всем диапазоне изменения определяющих параметров.

Формуле (2) соответствует следующая формула для интенсивности  $P$  выпадения частиц на подстилающую поверхность:

$$P = wq|_{z=0}. \quad (25)$$

Полученные формулы, как уже отмечалось, следует применять, прежде всего, для пылящих источников. Их использование в качестве функции Грина позволяет записать в аналитическом виде формулы для расчета концентраций монодисперсных и полидисперсных частиц в воздухе и их выпадений на подстилающую поверхность в случае пыля-

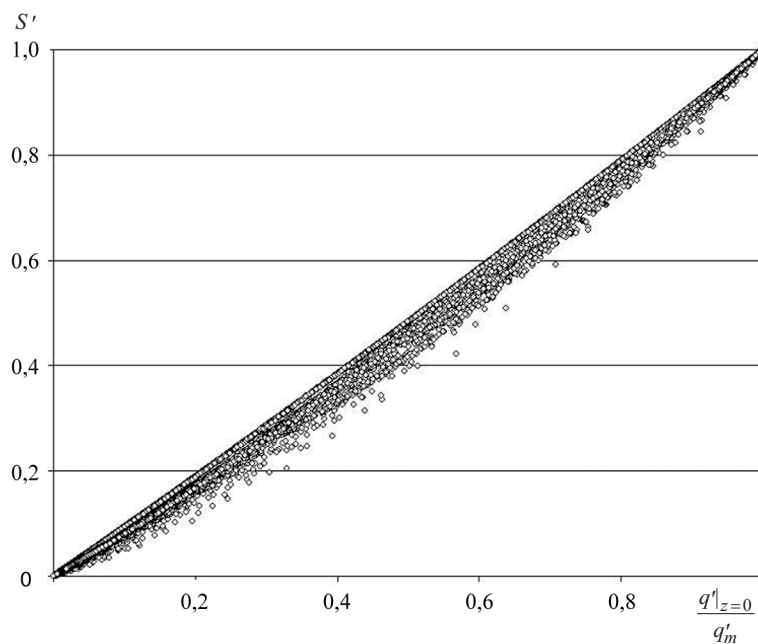


Рис. 3. Соотношение  $S'$  и  $\frac{q'|_{z=0}}{q'_m}$ .

щих источников произвольной формы при различных погодных условиях с учетом продолжительности процесса пыления. При практических расчетах эти задачи могут решаться на основе аппроксимации источника совокупностью рассредоточенных по нему виртуальных точечных источников с использованием принципа суперпозиции.

В заключение отметим, что с использованием полученной формулы можно решать некоторые практические задачи, к которым, в частности относятся:

— расчеты концентраций пыли, осредненных за длительный период времени (год, сезон или др.) и суммарного выпадения пыли на подстилающую поверхность за этот период;

— расчеты загрязнения воздуха и подстилающей поверхности за пределами источника с учетом спектра по  $w$  частиц, вовлеченных в воздушный поток над источником;

— восстановление параметров источника на основе данных подфакельных измерений выпадений частиц на подстилающую поверхность или их концентраций в воздухе (обратная задача атмосферной диффузии);

— оценка соотношения между мощностью первичного выноса пылевых частиц в воздух и их выпадения на самом источнике (отметим, что это соотношение пока не учитывается ни в одной из применяемых на практике методик расчета (Оникул, Яковлева, 2001)).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баренблатт Г. И., 1982. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. — Л.: Гидрометеиздат. — 255 с.

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

Буйков М. В., 1990. О граничном условии для уравнения турбулентной диффузии на подстилающей поверхности. — Метеорология и гидрология, № 9, с. 52—56.

Буйков М. В., 1992. О ветровом подъеме аэрозольных частиц. — Метеорология и гидрология. № 6, с. 45—52.

Бызова Н. Л., Нестеров А. В., 1988. Приземная концентрация и поток оседающей примеси. — Метеорология и гидрология, № 1, с. 30—36.

Бызова Н. Л., Оникул Р. И., 1965. Анализ поля концентраций тяжелой примеси по данным опытов на 300-метровой метеорологической башне. — Труды ГГО, вып. 172, с. 35—41.

Бютнер Э. К., 1978. Динамика приповерхностного слоя воздуха. — Л.: Гидрометеиздат. — 158 с.

Гаврилов В. П., Горматюк Ю. К., 1989. Рассеяние примесей от стационарных источников в приземном слое атмосферы. — *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 37—47.

Гандин Л. С., Соловейчик Р. Э., 1958. О распространении дыма из фабричных труб. — *Труды ГГО*, вып. 77, с. 84—94.

Дунский В. Ф., Нездурова И. С., Оникул Р. И., 1968. О расчете рассеяния оседающей примеси от линейного источника в пограничном слое атмосферы. — *Труды ГГО*, вып. 207, с. 28—37.

Махонько К. П., 1984. Об эффективной скорости ветрового подъема пыли с подстилающей поверхности. — *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 105—107.

Монин А. С., 1962. О граничном условии на поверхности земли для диффундирующей примеси. — В сб.: *Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха*. — М.: ИЛ, с. 477—478.

Оникул Р. И., 1961. О решении задач тепло- и влагообмена в нижних слоях атмосферы методом сеток. — В сб.: *Труды Координационной комиссии по численным методам прогноза погоды*. — Л.: Гидрометеиздат, с. 113—121.

Оникул Р. И., Хуршудян Л. Г., 1983. К вопросу о распространении пыли от ее наземных площадных источников. — *Труды ГГО*, вып. 467, с. 27—36.

Оникул Р. И., Яковлева Е. А., 2001. О расчете мощности ветрового выноса пылевидных веществ в атмосферу от наземных площадных источников. — *Инф. бюлл. № 2 (24) «Вопросы охраны атмосферы от загрязнения» (НПК «Атмосфера» при ГГО им. А. И. Воейкова)*, с. 7—47.

Оникул Р. И., Яковлева Е. А., 2002. Об учете некоторых особенностей промышленных источников при расчете загрязнения воздушного бассейна. — В сб.: *Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха. К 80-летию проф. М. Е. Берлянда*. — СПб: Гидрометеиздат, с. 76—99.

Фукс Н. А., 1955. *Механика аэрозолей*. — М.: Изд-во АН СССР. — 351 с.

Хуршудян Л. Г., 1998. Об особенностях расчета загрязнения воздуха некоторыми промышленными источниками неорганизованных выбросов пыли. — *Труды ГГО*, вып. 549, с. 108—120.

Rounds W., 1955. Solution of the two-dimensional diffusion equations. — *Trans. Amer. Geoph. Union*, V. 36, p. 395—405.

УДК 551.510.04

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА  
В ГОРОДЕ НА ТРИ ДНЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА**

*Т. В. Костарева<sup>1</sup>, Л. Р. Сонькин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Пермский ЦГМС

<sup>2</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

*Приведены результаты разработок схем прогноза загрязнения воздуха в городе на три дня с использованием прогностических карт погоды, составляемых в международных центрах. В качестве предикторов взяты предсказанные метеорологические характеристики и синоптические ситуации. Выявлена тесная корреляция между синоптическим предиктором, установленным по прогностическим картам, и интегральным показателем загрязнения воздуха в Перми. Прогностические схемы разработаны с использованием методов графической регрессии и множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей. Эффективность схем устанавливается на основе их испытаний как по зависимому материалу, так и по независимому в оперативных условиях. Делается вывод о возможности распространения данного подхода на другие города.*

**THREE-DAY FORECASTING OF THE URBAN AIR  
POLLUTION WITH THE USE OF THE NUMERICAL  
WEATHER FORECAST**

*T. V. Kostareva<sup>1</sup>, L. R. Sonkin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Permski AHEM

<sup>2</sup> Voeikov Main Geophysical Observatory

*Results of the development of forecasting schemes for the urban air pollution with the use of prognostic weather maps are presented. The forecast time lag is chosen as three days. Meteorological characteristics and synoptic situations are selected as predictors. A close correlation between*

*the synoptic predictor, determined with the using of prognostic maps and integrated parameter of the air pollution in the city of Perm is established. Forecasting schemes are developed using methods of the graphical regression and multiple linear regression with initial elimination of the nonlinear relationships. The efficiency of the schemes is established on the basis of their validation using the «dependent» data sets as well as the «independent» ones obtained in the operational mode. The conclusion is drawn that this approach could be applied to predicting the air pollution in other cities.*

В последнее время проявляется все больший интерес к вопросу об увеличении заблаговременности прогноза загрязнения воздуха в городе. Ряд мероприятий по временному сокращению выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) в различных отраслях промышленности требует предварительной подготовки.

Задача прогноза загрязнения воздуха в городе повышенной заблаговременности уже решалась в ранее выполненных работах (Прогноз высоких уровней, 2001; Система прогноза и предотвращения, 2004; Сонькин, 1991; Сонькин, Николаев, Ивлева, 1997). Схемы такого прогноза разрабатывались с использованием материалов для Санкт-Петербурга, Уфы, Архангельска. Подход к решению задачи прогноза загрязнения воздуха повышенной заблаговременности заключается в том, что в качестве предикторов используются ожидаемые метеорологические характеристики, полученные на основе численного прогноза, который составляется в международных центрах погоды. Предиктантом здесь является интегральный показатель загрязнения воздуха в городе — в нашем случае параметр  $P$  (Руководство, 1993). Этот параметр является частотной характеристикой и определяет долю от общего числа измеренных в течение дня значений концентрации ( $n$ ) и значений, которые являются существенно повышенными ( $m$ ). Значение  $P$  меняется от 0 до 1 (или от 0 до 100 %).

В данной работе в связи с необходимостью широкого внедрения среднесрочного прогнозирования загрязнения воздуха на основе анализа новых данных изыскиваются возможности усовершенствования имеющегося подхода, повышения эффективности таких прогнозов, их оправдываемости и предсказуемости высоких уровней. Приводятся

материалы разработки схем прогноза загрязнения воздуха на три дня по данным для Перми.

Схемы прогноза разработаны для зимнего и летнего периодов. Использовались материалы наблюдений в Перми за четыре года (1998—2001 гг.) и архив прогностических карт погоды (на три дня), поступивших из международного центра в Рединге. Был рассчитан параметр  $P$  по совокупности примесей. При расчете учитывались среднесезонные значения концентраций на каждом стационарном пункте по каждой примеси как среднее из трех значений среднемесячных концентраций за летние и зимние месяцы каждого года в отдельности. Следует заметить, что при выполнении предыдущих разработок использовались материалы о параметре  $P$ , рассчитанном в оперативной работе с учетом средних концентраций за соответствующий период предыдущего года. Использование значений  $P$ , рассчитанных способом, применяемым в данной работе, позволяет охарактеризовать относительный уровень загрязнения воздуха по городу в целом точнее, чем в случае применения в схемах параметра  $P$ , рассчитанного в оперативном порядке.

Для расчета параметра  $P$  были взяты данные семи стационарных постов, на которых наблюдения за концентрациями в воздухе 13 примесей (пыль, сернистый газ, сульфаты, окись углерода, двуокись азота, окись азота, сероводород, фенол, фторид водорода, хлор, соляная кислота, аммиак, формальдегид) проводились три раза в сутки. Общее число случаев в каждом из рассмотренных двух рядов (за летний и зимний сезоны) составляет около 300.

В качестве предикторов были взяты следующие прогностические характеристики: направление и скорость геострофического ветра ( $d_g$  и  $V_g$ ), средняя температура в слое ОТ 500/1000 ( $\bar{T}$ ), форма термического поля ( $\theta$ ), предсказанная на три дня синоптическая ситуация ( $S_n$ ) и параметр  $P$  в день составления прогноза ( $P'$ ). Геострофический ветер определялся по прогностической приземной карте. По прогностической карте ОТ 500/1000 снимались значения ожидаемой средней температуры слоя и определялась форма термического поля ( $\theta$ ) в баллах.

С учетом ранее выявленных связей между  $\theta$  и интегральным показателем загрязнения воздуха в городе  $P$  (Прогноз высоких уровней, 2001; Сонькин, Николаев, Ивлева, 1997) предиктору  $\theta$  были приданы следующие баллы:

- 1 — область или ложбина холода,
- 2 — периферия области холода,
- 3 — изотермы близки к прямолинейным,
- 4 — периферия области тепла,
- 5 — область или гребень тепла.

Средние значения параметра  $P$  для Перми в зависимости от формы термического поля  $\theta$  в летний период представлены в табл. 1. В холодную часть года связь между параметром  $P$  и  $\theta$  не обнаруживается.

Таблица 1

**Средние значения параметра ( $\bar{P}$ ) в зависимости от формы термического поля ( $\theta$ )**

	$\theta$ баллы				
	1	2	3	4	5
$\bar{P}$	0,14	0,16	0,22	0,21	0,24
Доверительный интервал	0,03	0,05	0,07	0,13	0,06

Из таблицы видно, что наибольший уровень загрязнения воздуха в летний период имеет место в области тепла, наименьший — в области холода. Были рассмотрены зависимости параметра  $P$  от ожидаемых через три дня направления ( $d_g$ ) и скорости ( $V_g$ ) геострофического ветра, а также средней температуры в слое 500/1000 ( $\bar{T}$ ). В зависимости от скорости геострофического ветра ( $V_g$ ) наиболее четко проявляются повышенный уровень загрязнения воздуха при штиле и его понижение при увеличении  $V_g$  до 18—20 м/с. В зависимости от направления геострофического ветра ( $d_g$ ) в среднем прослеживается повышенный уровень загрязнения воздуха при ветре восточных и юго-западных румбов. Достаточно четко проявляется рост уровня загрязнения воздуха при повышении температуры в слое 500/1000 гПа. Для зимнего периода было установлено, что в среднем наибольшее значение параметра  $P$  отмечается при штиле и юго-восточном ветре при его скорости 3—6 м/с.

В табл. 2 и 3 представлены значения синоптического предиктора  $Sn$  для прогностических схем на три дня для летнего и зимнего периодов.  $Sn$  численно выражается средним значением параметра  $P$  при каждой из выделенных ситуаций. Выделение типов синоптических ситуаций было проведено на основе их детального анализа, в том числе по



материалам прогностических карт. Классификация синоптических ситуаций была проведена с учетом классификации, полученной при разработке прогностической схемы для Перми с заблаговременностью одни сутки.

Таблица 2

**Значения синоптического предиктора для схемы прогноза загрязнения воздуха на три дня для летнего периода**

№ п/п	Среднее значение параметра $P$ и доверительный интервал	Типы синоптических ситуаций	Число случаев
1	$0,35 \pm 0,02$	Стационарный антициклон	15
2	$0,28 \pm 0,02$	Малоградиентное поле	35
3	$0,27 \pm 0,04$	Восточная периферия антициклона	12
4	$0,26 \pm 0,01$	Западная, северо-западная периферии антициклона	9
5	$0,21 \pm 0,02$	Ситуации 1, 2, 4 продолжительностью не более суток	20
6	$0,16 \pm 0,04$	Передняя часть циклона, теплый сектор	21
7	$0,15 \pm 0,04$	Периферии антициклона, кроме ситуаций 3 и 4	38
8	$0,14 \pm 0,02$	Тыл циклона, западная, северо-западная, северная и северо-восточная периферии циклона	52
9	$0,12 \pm 0,01$	Центр циклона, ось ложбины	18

Примечание. Ситуация 3 (восточная периферия антициклона) чаще всего наблюдалась в течение только одного дня (9 раз из 12), но и при этом отмечался повышенный уровень загрязнения воздуха в городе. В связи со сказанным продолжительность существования ситуаций этого типа не учитывалась.

Из табл. 2 и 3 следует, что по своему характеру связи между загрязнением воздуха и ожидаемыми синоптическими условиями зимой и летом близки, однако имеются и некоторые различия. Так, на восточной периферии антициклона в среднем высокий уровень загрязнения воздуха отмечается только в летний сезон. По-видимому, летом, когда процессы протекают вяло и градиенты давления невелики, такой ситуации сопутствует теплая воздушная масса, что, как известно, способствует повышению уровня загрязнения воздуха. Очевидно, что зимой такой ситуации обычно сопутствует холодная воздушная масса.

Таблица 3

**Значения синоптического предиктора для схемы прогноза загрязнения воздуха на три дня для зимнего период**

№ п/п	Среднее значение параметра $P$ и доверительный интервал	Типы синоптических ситуаций	Число случаев
1	$0,35 \pm 0,02$	Стационарный антициклон, малоградиентное поле, гребень	12
2	$0,24 \pm 0,04$	Северо-западная, западная периферия антициклона	14
3	$0,16 \pm 0,07$	Ситуации 1 и 2 продолжительностью не более суток	21
4	$0,11 \pm 0,03$	Периферии антициклона, кроме западной и северо-западной	22
5	$0,11 \pm 0,03$	Тыл циклона	19
6	$0,10 \pm 0,05$	Передняя часть циклона и теплый сектор	69
7	$0,08 \pm 0,02$	Циклон, ложбина	19

С учетом полученных связей в соответствии с рекомендациями (Руководство, 1993) рассматриваемые предикторы были преобразованы с целью исключения нелинейности связей. Результаты расчета коэффициентов корреляции ( $r$ ) между параметром  $P$  и преобразованными предикторами представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Коэффициенты корреляции ( $r$ ) между показателем загрязнения воздуха (параметром  $P$ ) и предикторами**

Предиктор . . . . .	$P'$	$Sn$	$P(d_g)$	$P(V_g)$	$P(\bar{T})$	$P(\theta)$
$r$ , лето . . . . .	0,25	0,73	0,22	0,20	0,39	0,42
$r$ , зима . . . . .	0,10	0,63	0,25	0,23	0,06	0,05

В таблице  $P(d_g)$ ,  $P(V_g)$ ,  $P(\bar{T})$  и  $P(\theta)$  — преобразованные предикторы  $d_g$ ,  $V_g$ ,  $\bar{T}$ ,  $\theta$ . Преобразование предикторов  $P'$  и  $Sn$  не проводилось, поскольку связи параметра  $P$  с этими предикторами близки к линейным.

Из табл. 4 видно, что наибольшую значимость как в летний, так и в зимний период имеет синоптический предиктор. Значимость предикторов  $P(d_g)$  и  $P(V_g)$  приблизительно одинакова в течение всего года. В летний период значимость предикторов  $P(\bar{T})$  и  $P(\theta)$  относительно высока, а в зимний зависимости параметра  $P$  от этих предикторов не обнаруживается. Поэтому при разработке схемы прогноза загрязнения воздуха в городе на три дня для летнего периода использовались все шесть предикторов, для зимнего только четыре ( $P'$ ,  $Sn$ ,  $P(d_g)$ ,  $P(V_g)$ ).

Статистические схемы прогноза загрязнения воздуха на три дня разработаны с использованием метода множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей. Для выполнения такой разработки в первую очередь были преобразованы предикторы. С учетом характера связей каждое значение предикторов было заменено на соответствующее среднее значение параметра  $P$ . Преобразование предиктора  $\theta$  осуществлялось в соответствии с табл. 1.

Далее с использованием стандартной программы был применен в чистом виде метод множественной линейной регрессии. Полученные уравнения регрессии для прогноза на три дня имеют следующий вид:

для летнего периода

$$P = -0,08 + 0,05P' + 0,79Sn + 0,19P(\theta) + 0,15P(d_g) + 0,04P(V_g) + 0,17P(T);$$

для зимнего периода

$$P = -0,12 + 0,07P' + 0,94Sn + 0,55P(d_g) + 0,46P(V_g).$$

Испытание разработанных схем прогноза проводилось сначала на независимом материале отдельно для зимнего и летнего периода. Использовался весь объем данных. Для оценки эффективности разработанных схем был рассчитан критерий Багрова ( $H^*$ ). Результаты испытания представлены в табл. 5.

Данные об оправдываемости прогнозов загрязнения воздуха и предсказуемости его наиболее высоких уровней, а также рассчитанные значения критерия Багрова указывают на достаточную эффективность разработанных прогностических схем.

Испытание разработанных схем прогноза на независимом материале проводилось в оперативном порядке в 2005 и 2006 гг. Было составлено 155 прогнозов по данным за зимний сезон и 162 по данным за летний сезон. Оправдываемость прогнозов составила 92 и 88 % соответствен-

Таблица 5

## Эффективность прогностических схем

Сезон	Общая оправдываемость, %	Оправдываемость прогнозов высоких уровней, %	Предсказуемость наиболее высоких уровней, % ( $P \geq 0,35$ )	Критерий Багрова, $H^*$
Зима	91	77	86	0,88
Лето	93	84	73	0,89

но, и в частности оправдываемость прогнозов высоких уровней 60 и 80 %. Подтвердилась достаточно хорошая предсказуемость наиболее высоких уровней загрязнения воздуха. Летом из 15 случаев с наибольшими значениями  $P$  ( $P \geq 0,35$ ) было предсказано 12, зимой из 10 случаев было предсказано шесть.

В соответствии с решением Технического совета Уральского УГМС, который рекомендовал к внедрению разработанные схемы прогноза, в 2007 г. в Пермском ЦГМС начали составляться оперативные прогнозы загрязнения воздуха на три дня. Было составлено 165 прогнозов, оправдываемость которых равна 86 %. Из 14 прогнозов высокого уровня загрязнения оправдалось восемь. Схема прогноза загрязнения воздуха на три дня внедрена в оперативную практику Пермского УГМС.

С использованием изложенного в данной работе подхода для г. Екатеринбурга была разработана статистическая схема прогноза на три дня. В ходе предварительных испытаний были получены следующие результаты. Оправдываемость прогнозов составила для зимы 88 %, для лета — 91 %. Получена высокая предсказуемость опасных уровней загрязнения воздуха.

На основе выполненного исследования были сделаны выводы, имеющие важное значение для развития работ по среднесрочному прогнозированию загрязнения воздуха в городах РФ. Во-первых, удалось более четко, чем ранее, выявить роль синоптической ситуации в качестве предиктора в схемах прогноза, и это весьма существенно в связи с тем, что анализировались прогностические карты погоды. По-видимому, синоптическая ситуация прогнозируется достаточно успешно, осо-

бенно ее влияние на уровень загрязнения в городе. Это означает, что имеется возможность успешного прогнозирования загрязнения воздуха с трехдневной заблаговременностью для любого города за счет обстоятельного и детального анализа связей показателей загрязнения с ожидаемой синоптической ситуацией. Очевидно, что синоптическая ситуация представляет собой естественную комплексную характеристику, включающую автоматически все особенности атмосферных процессов. Характер связей между синоптическими ситуациями и загрязнением воздуха учитывается в таком виде, в каком он проявляется в данном конкретном городе. Не менее важно и то обстоятельство, что существующие численные методы среднесрочного прогноза позволяют прогнозировать синоптическую ситуацию лучше, чем отдельные метеорологические характеристики.

Представляет интерес тот факт, что влияние термических характеристик на уровень загрязнения воздуха в городе проявляется летом в большей степени, чем зимой. Именно летом наиболее четко обнаруживается увеличение содержания примесей в воздухе при повышении температуры воздуха в нижнем слое атмосферы.

В заключение можно отметить наличие определенных перспектив в развитии работ по увеличению заблаговременности прогнозов загрязнения воздуха. По результатам выполненной разработки можно сделать вывод о существовании в настоящее время реальных возможностей широкого внедрения в системе Росгидромета среднесрочного прогнозирования загрязнения воздуха в городах. Одной из важных задач, которые требуется решать в ближайшее время, является прогноз на три дня экстремально высоких уровней загрязнения воздуха.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Прогноз высоких уровней загрязнения воздуха в городах. Прогноз загрязнения воздуха на трое суток (методические рекомендации), 2001.— СПб: Гидрометеоздат.

Руководство по прогнозу загрязнения воздуха, 1993. РД 52.04.306-92. — СПб: Гидрометеоздат. — 105 с.

Система прогноза и предотвращения высоких уровней загрязнения воздуха в городах, 2004. — СПб: Гидрометеоздат.

Сонькин Л. Р., 1991. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат. — 224 с.

Сонькин Л. Р., Николаев В. Д., Ивлева Т. П., 1997. Среднесрочный прогноз загрязнения воздуха в городах. — Труды ГГО, вып. 544.

УДК 551.510

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ФОРМИРОВАНИЯ  
ПОВЫШЕННЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ФОРМАЛЬДЕГИДА В  
АТМОСФЕРЕ ГОРОДА**

*И. А. Воробьева*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

*Во многих городах Российской Федерации в последнее время отмечается значительный рост концентрации формальдегида. Зачастую невозможно определить источники этого вещества, так как данные о выбросах формальдегида отсутствуют. В работе рассмотрены условия формирования повышенных концентраций формальдегида в атмосфере промышленных городов на примере г. Норильска. Показано, что повышенные концентрации формальдегида могут формироваться не только в результате непосредственных выбросов этого вещества, но и в процессе многочисленных химических реакций, протекающих в загрязненной атмосфере промышленного города.*

**ANALYSIS OF MAIN CONDITIONS OF THE INTENSE  
FORMATION OF FORMALDEHYDE IN THE ATMOSPHERE  
OF INDUSTRIAL CITY**

*I. A. Vorobyeva*

Voeikov Main Geophysical Observatory

*High concentrations of formaldehyde recently are marked in many cities of the Russian Federation. Frequently it is impossible to define sources of this substance as data about emissions of formaldehyde often is absent. The main conditions of the intense formation of formaldehyde on an example of Norilsk are considered here. It is shown, that large formaldehyde concentrations can be formed not only as a consequence of direct emissions of this substance, but also can be created as a result of many chemical reactions proceeding in the polluted atmosphere of industrial city.*

## Введение

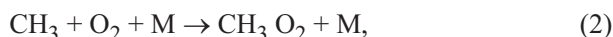
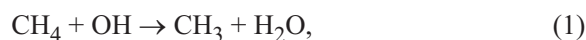
Среди множества вредных веществ, содержащихся в атмосфере городов, одно из важных мест занимает формальдегид.

Рекомендованное Всемирной организацией здравоохранения для Европы пороговое значение средней за 30 мин концентрации формальдегида составляет  $100 \text{ мкг/м}^3$ . В России приняты более жесткие нормы, и предельно допустимая концентрация формальдегида (ПДК), осредненная за 30 мин, составляет  $35 \text{ мкг/м}^3$ , среднесуточное значение ПДК равно  $3 \text{ мкг/м}^3$  (Ежегодник, 2002).

При концентрациях, существенно превышающих предельно допустимую, формальдегид оказывает разнообразное токсическое воздействие на живые организмы. Степень и характер реакции организма зависят от времени воздействия, концентрации, способа контакта (вдыхание, прикосновение, поступление через желудочно-кишечный тракт и т. д.), а также от индивидуальной чувствительности организма. При любом способе поступления формальдегид проникает практически во все органы и ткани, действуя губительно на центральную нервную систему человека и поражая слизистую оболочку глаз и дыхательные пути (Лазарева, 1976).

Образование формальдегида в реакционной смеси при условиях, приближенных к атмосферным, зарегистрировано в процессе фотохимического окисления метана, этана, изопентана, этилена, пропилена, изопрена, толуола, метанола, диметилсульфида и некоторых других веществ (Скубневская, 1994).

Примером образования и расходования формальдегида в процессе фотохимической трансформации органических примесей в атмосфере может служить фотоокисление метана при атмосферном давлении и отсутствии катализаторов:



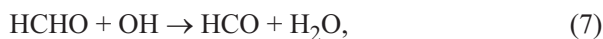
В атмосфере присутствует большое число неметановых углеводородов, которые также могут способствовать образованию формальде-

гида. Однако метан в высоких концентрациях более важен как компонент реакции образования формальдегида.

Удаление формальдегида из атмосферы происходит благодаря фотолизу двумя путями (Seinfeld, 1997):



а также в процессе реакции с радикалом ОН:



Фотодиссоциация (разрушение под влиянием солнечной радиации) формальдегида относится к одному из основных путей стока формальдегида в атмосфере (Безуглая, 2003).

Таким образом, формальдегид образуется в процессе фотоокисления многих классов органических соединений в атмосфере. Повышенные концентрации оксидов азота и озона, а также органических примесей в условиях фотохимического смога приводят к образованию повышенных концентраций формальдегида. Это происходит обычно в безветренную ясную погоду, когда метеоусловия способствуют накоплению примесей и последующей фотохимической трансформации (Скубневская, 1994).

Более того, образование формальдегида экспериментально зафиксировано при горении многих органических веществ, содержащихся в органическом топливе). Горящее топливо представляет собой сложную реагирующую систему. Формальдегид образуется в пламени как промежуточный продукт. Следует отметить, что цепочка превращений от молекулы метана до молекулы формальдегида при горении короче, чем при фотоокислении в атмосфере. Причина этого заключается в высоких концентрациях свободных радикалов в пламени, что приводит к увеличению скорости реакций (Гардинер, 1998).

Наблюдения за концентрацией формальдегида проводятся в 141 городе России на 337 станциях. Результаты измерений показывают, что в последние годы во многих городах отмечается заметный рост концентраций этой примеси. Средняя за год концентрация формальдегида в городах России составляет  $8 \text{ мкг/м}^3$ , что выше среднесуточного значе-



ния ПДК почти в три раза. В соответствии с Ежегодником концентрация формальдегида превышала ПДК в 117 городах России (Ежегодник, 2006).

В большинстве случаев по официальным данным в процессе производства на промышленных предприятиях формальдегида либо вовсе не вырабатывается, либо выбросы невелики, и концентрации его должны быть гораздо меньше полученных в результате измерений (Ежегодник, 2003). Поэтому задачей данного исследования является выяснение причин возникновения высоких концентраций формальдегида.

### **Используемые данные**

Для решения поставленной задачи использовались данные наблюдений за концентрацией формальдегида в Норильске за 2002 г. Наблюдения за концентрацией формальдегида проводились регулярно, три раза в сутки: в 7, 13 и 19 ч по местному времени. Одновременно с измерением концентрации формальдегида в указанные сроки, как и на других станциях Росгидромета, проводились наблюдения за температурой воздуха, скоростью и направлением ветра. Всего было использовано 1020 значений концентрации формальдегида.

Для выяснения причин повышения концентрации формальдегида в атмосфере города выполнен статистический анализ ежедневных данных измерений концентрации формальдегида за 2002 г. на двух станциях.

Одна станция наблюдений (станция № 3) расположена в северной части города, другая (станция № 10) находится в южной части Норильска (рис. 1).

Норильск является крупным центром цветной металлургии. Он расположен на полуострове Таймыр, в 300 км к северу от Северного полярного круга. Основной вклад в выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников вносят предприятия цветной металлургии и ТЭЦ.

Норильск окружен промышленными производствами практически со всех сторон: к северо-западу от города находится Медный завод, на западе — Надеждинский металлургический завод, в южной части города — Никелевый завод и Агломерационная фабрика. На восточной окраине города расположена ТЭЦ (см. рис. 1).



Рис. 1. Схема размещения пунктов наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха и промышленных объектов в г. Норильске.

Основными источниками загрязнения атмосферы являются предприятия Норильского горно-металлургического комбината. По информации о выбросах за 2002 г. в атмосферу Норильска было выброшено за год 1846,6 тыс. т. диоксида серы, 8,3 тыс. т. оксида азота, 14,5 тыс. т. окиси углерода, 0,63 тыс. т. меди; сведения о выбросах формальдегида отсутствуют (Ежегодник, 2003).

По данным Красноярского территориального центра по мониторингу загрязнения окружающей среды в 2002 г. измеренные концентрации взвешенных веществ, бенз(а)пирена, диоксида серы и фенола превышали ПДК почти в два раза, что соответствует данным о выбросах этих веществ в Норильске.

Среднегодовая концентрация формальдегида в 2002 г. составила 18,5 мкг/м<sup>3</sup>, максимальная разовая — 314 мкг/м<sup>3</sup>. Видно, что эти концентрации существенно превышают ПДК. Причины появления таких высоких концентраций на первый взгляд выявить затруднительно, так как данные о выбросах этого вещества отсутствуют.

### Результаты анализа и основные выводы

Для выяснения степени влияния направления ветра на концентрацию формальдегида был выполнен статистический анализ их связи. Для этого все данные наблюдений за концентрацией формальдегида были разделены на группы в зависимости от направления ветра, при

котором они регистрировались. Для того чтобы предотвратить влияние погрешности, из обработки были исключены случаи со значениями концентрации формальдегида ниже  $50 \text{ мкг/м}^3$ .

Из рис. 2, на котором представлена роза загрязнения атмосферы для двух станций Норильска за 2002 г., видно, что на станции № 3 наибольшее число случаев, когда концентрация формальдегида превышала  $50 \text{ мкг/м}^3$ , зарегистрировано в основном при трех основных направлениях ветра (см. рис. 2 а): северном, северо-западном и юго-восточном. В северо-северо-западном направлении, как следует из рис. 1, расположен Медный завод, а в юго-восточном — ТЭЦ.

На станции № 10 высокие концентрации формальдегида преобладали при северо-западном, юго-западном и юго-восточном направлениях ветра (см. рис. 2 б). В этом случае высокие концентрации формальдегида обусловлены его переносом со стороны Никелевого завода, Агломерационной фабрики и Надеждинского металлургического завода и ТЭЦ.

Проведенный анализ показывает, что повышенные концентрации формальдегида в рассматриваемый период времени наблюдались наиболее часто при северо-западном и юго-восточном направлении ветра.

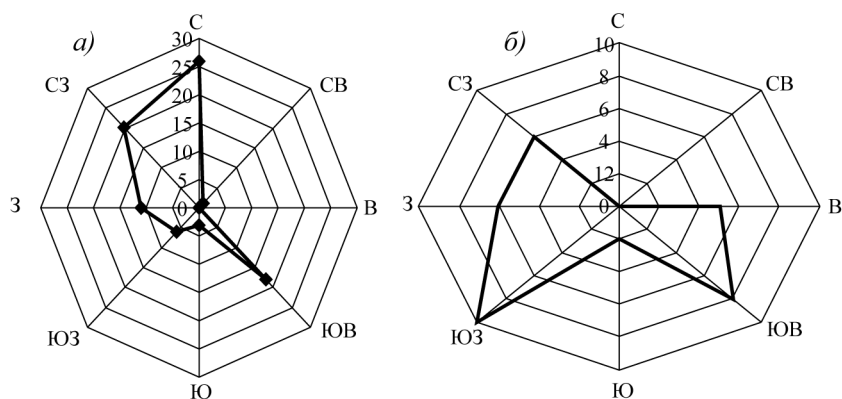


Рис. 2. Роза загрязнения атмосферы: число случаев, когда концентрация формальдегида превышала  $50 \text{ мкг/м}^3$  при различных направлениях ветра для двух станций г. Норильска за 2002 г.

а — станция № 3, число штилей 25 %, общее число случаев 37; б — станция № 10, число штилей 0, общее число случаев 86.

Если соотнести эту информацию с планом расположения промышленных производств на данной территории, можно с достаточной долей уверенности указать, что предположительно высокие концентрации формальдегида обусловлены его поступлением от Медного и Никелевого заводов, а также Агломерационной фабрики и ТЭЦ.

Далее был выполнен анализ влияния температуры воздуха на концентрацию формальдегида. Из рис. 3, на котором представлен годовой ход концентрации формальдегида за 2002 г., видно, что в приземном слое воздуха в летние месяцы с повышением температуры наблюдается значительное и устойчивое увеличение концентрации формальдегида. При самой высокой температуре воздуха и концентрация формальдегида достигает максимума.

В Норильске по данным за 2002 г. среднемесячная концентрация формальдегида имеет четко выраженный годовой ход: минимальные значения наблюдаются в зимние месяцы, максимальные — в августе. В течение всей зимы при температуре воздуха ниже 0 °С формальдегид в

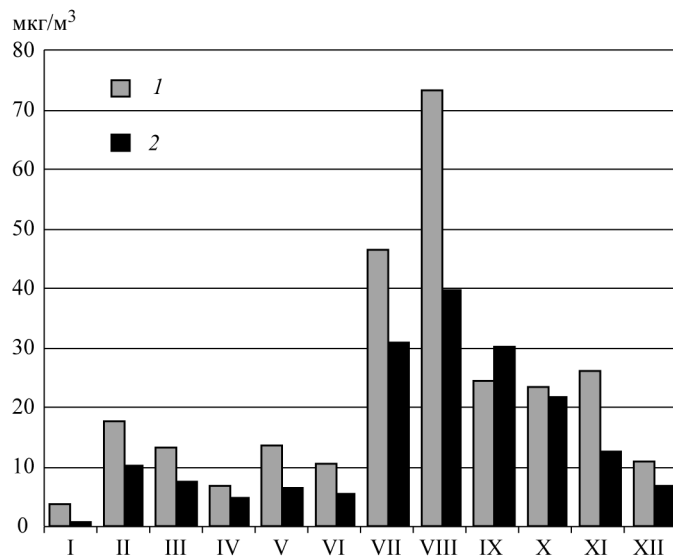


Рис. 3. Годовой ход среднемесячной концентрации формальдегида в воздухе (мкг/м³) на станциях № 3 (1) и № 10 (2) г. Норильска за 2002 г.

воздухе практически отсутствует, и его концентрация редко превышает  $0,004 \text{ мг/м}^3$ , однако в дальнейшем, с повышением температуры, постепенно возрастает. Наибольшие значения концентрации формальдегида в Норильске отмечаются в основном в теплую часть года (с июля по сентябрь) — они примерно в два раза выше, чем в холодный период (см. рис. 3).

Во многих городах России в годовом ходе отмечается максимум концентрации формальдегида в теплое время года и почти полное его отсутствие в зимние месяцы (Скубневская, 1994), и это соответствует годовому ходу концентрации для Норильска.

Как следует из полученных результатов, наибольшая повторяемость повышенных значений концентрации формальдегида наблюдалась при температуре выше  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Поскольку температура в Норильске крайне редко превышает  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , для дальнейшего анализа были взяты только данные наблюдений за летний период при температуре  $10\text{—}25 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этом, как и в случае анализа связи с направлением ветра, использовались только значения концентрации формальдегида выше  $50 \text{ мкг/м}^3$ .

Из рис. 4, на котором представлены зависимости высоких концентраций формальдегида от температуры воздуха за 2002 г. для двух станций Норильска, следует, что между этими рядами значений существует довольно хорошая статистическая связь. Чем выше температура,

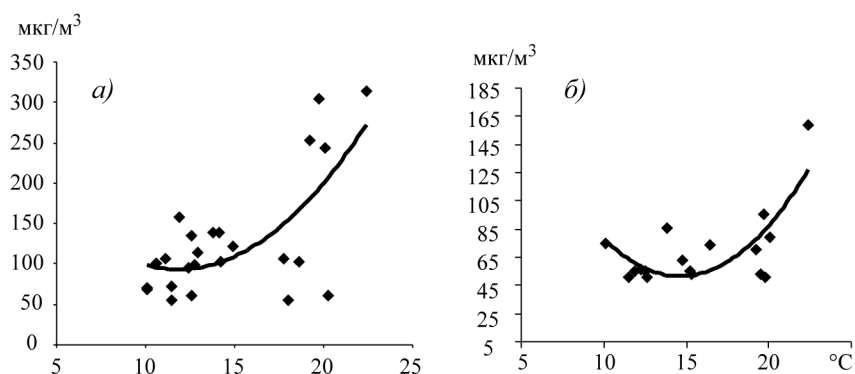


Рис. 4. Зависимость концентрации формальдегида ( $\text{мкг/м}^3$ ) от температуры воздуха ( $^\circ\text{C}$ ) на станции № 3 (а) и станции № 10 (б) г. Норильска по данным за 2002 г.

тем выше концентрации формальдегида. При этом коэффициент корреляции на станции № 3 (см. рис. 4 а) составил 0,66, а на станции № 10 (см. рис. 4 б) 0,59.

Это означает, что фактически образование формальдегида возможно в намного более теплом воздухе, нагретом, например, факелом выброса производства.

Однако в Норильске, как уже было отмечено, температура воздуха редко превышает 25 °С, поэтому невозможно судить о том, как изменится эта связь при более высокой температуре воздуха.

### Заключение

Известно, что в выбросах промышленных объектов в достаточном количестве содержатся вещества, являющиеся исходными продуктами для образования формальдегида. Можно предположить, что случаи повышенного содержания формальдегида в атмосфере Норильска связаны не с его непосредственным выбросом в атмосферу, а с образованием его в ходе различных химических реакций, протекающих в факелах предприятий или около них, где возможен интенсивный прогрев воздуха.

Кроме того, высокие концентрации формальдегида в атмосфере промышленного города могут быть обусловлены общим очень высоким загрязнением воздуха в результате фотохимических или иных реакций, вследствие чего формируется так называемое вторичное загрязнение.

В дальнейшем необходимо уточнить зависимость концентрации формальдегида от температуры воздуха по данным для других городов, расположенных в различных климатических условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безуглая Э. Ю., Ивлева Т. П., 2003. Формальдегид в атмосфере городов. — В сб.: Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. — СПб: Информационный бюллетень №1(27) ИПК «Атмосфера» при ГГО им. Воейкова.
- Гардинер У., 1988. Химия горения. — М.: Мир.— 462 с.
- Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2004 год, 2006. — М.
- Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации за 2002 год, 2003. — СПб.

Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2001 год, 2002. — СПб.

Лазарева Н. В., Гадаскина И. Д., 1976. Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. Изд. 7-е, перераб. и доп. Т. 1: Органические вещества. — Л.: Химия. — 592 с.

Огородников С. К., 1984. Формальдегид. — Л.: Химия. — 280 с.

Скубневская Г. И., Дульцева Г. Г., 1994. Загрязнение атмосферы формальдегидом. Аналитический обзор. — Новосибирск. — 70 с.

Moortgat G. K., Warneck P. J., 1979. CO and H<sub>2</sub> quantum yields in the photodecomposition of formaldehyde in air. — Chem. Phys., V. 70, No. 8, p. 3639—3651.

Seinfeld, J. H., Pandis S. N., 1997. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. — NY: Wiley-Interscience. — 1360 p.

УДК 502.3 (571.642)

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ СЕВЕРО-КУРИЛЬСКА  
СЕРОВОДОРОДОМ (ОСТРОВ ПАРАМУШИР,  
КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)**

*S. Kim*<sup>1</sup>, *E. Kato*<sup>1</sup>, *V. E. Suchkov*<sup>1</sup>, *T. A. Kotenko*<sup>2</sup>, *L. V. Kotenko*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГУ «Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», г. Южно-Сахалинск

<sup>2</sup> Камчатский институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский

*Обобщены результаты измерений концентраций сероводорода в районе вулкана Парамушир на одном из Курильских островов. На конкретных материалах показан вклад выбросов сероводорода от естественного источника в загрязнение воздуха, который в несколько раз превосходит вклад источников антропогенного происхождения.*

**SEVERO-KURILSK AIR POLLUTION WITH HYDROGEN  
SULPHIDE (PARAMUSHIR, ISL. KURILS)**

*S. Kim*<sup>1</sup>, *E. Kato*<sup>1</sup>, *V. E. Suchkov*<sup>1</sup>, *T. A. Kotenko*<sup>2</sup>, *L. V. Kotenko*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GU «Sakhalin Administration for Hydrometeorology and Environment monitoring»

<sup>2</sup> Kamchatsky Institute of Volcanology and Seismology DVO RAS,  
Petropavlovsk-Kamchatsky

*The results of hydrogen sulphide concentration measurements have been generalized for the area of Paramushir Volcano at one of Kuril Islands. Using specific material the contribution of hydrogen sulphide emissions from a natural source to air pollution is shown which is several times higher than the contribution of antropogenic sources.*

**Введение**

Парамушир — остров в северной группе Курильских островов, на котором расположены действующие и потухшие вулканы высотой до 1816 м. Одним из действующих вулканов острова Парамушир является вулкан Эбеко высотой 1138 м.



Вулкан Эбеко расположен в северной части о. Парамушир на расстоянии 7 км к северо-северо-западу от г. Северо-Курильска, в северной части хребта Вернадского. Потенциальную опасность при извержениях вулкана представляют пепловые облака, пеплопады, лахары, облака сернистого газа и сероводорода (табл. 1). Пепловые выбросы вулкана, достигающие высоты 5 км, опасны для аэропорта в Северо-Курильске и для полетов самолетов местных авиалиний, которые происходят на высоте 400—8000 м. Пеплопады возможны в г. Северо-Курильске, поселке Озерновский и даже в Петропавловске-Камчатском.

Таблица 1

**Проявления активности вулкана Эбеко**

Год	Проявления активности вулкана
1859	Извержение огромного количества серных газов
1934—1935	Эксплозивное извержение из кратера Средний: вначале серия фреатических взрывов, затем фреато-магматическое извержение. Выбросы гигантских бомб с поверхностью типа «хлебной корки» и облаков пепла с сернистым газом, излияние жидкой серы из трещин на склонах центрального конуса
1963	Очень слабое фреатическое извержение, связанное с усилением фумарольной активности кратера Восточный
1965	Фреатические взрывы
1967	Фреатическое извержение в кратере Северный
1987	Фреатические взрывы пять-шесть раз в сутки и постоянная эмиссия газов
1989—1990	Фреатическое извержение в кратере Северный (выбросы газопепловой смеси с частотой до нескольких сотен в месяц)
1991	Газовые выбросы с небольшим количеством пепла в течение нескольких дней
1998	Усиление фумарольной деятельности, сопровождаемое фреатическим взрывом в кратере Северный
2005	Фреатический взрыв в Активной воронке, а также появление и исчезновение в ней внутреннего озера
1946—1959, 1975, 2004—2005	Постоянная интенсивная сольфатарная активность

### Оценка парогазовых выбросов вулкана Эбеко

Одним из видов вулканической опасности является загрязнение воздушного бассейна вулканическими газами. В эруптивном цикле вулкана выделены четыре типа активности: пароксизмальные извержения вулканического типа, межпароксизмальные извержения фреатического типа, усиление фумарольной деятельности и постоянная умеренная фумарольная деятельность. Периоды фреатических извержений продолжаются 2—4 года, периоды межэруптивной деятельности — 20—30 лет. Последнее фреатическое извержение наблюдалось в 1987—1991 гг. (Мелекесцев и др., 1993; Меняйлов и др., 1992).

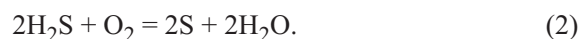
27 января 2005 г. произошла резкая активизация деятельности вулкана в районе так называемой Активной воронки Северного кратера. На восточной и северо-восточной внутренних стенках Активной воронки произошли мощные выбросы газов. Высота подъема струй изменялась в зависимости от метеоусловий от 80 до 1200 м. При ясной погоде парогазовый столб высотой от 400 до 1200 м над кратером был виден из города. По высоте подъема газовых струй был определен вынос тепла и газов вулкана по сравнению со спокойным состоянием. В соответствии с известными формулами (Федотов, 1982) была рассчитана величина теплового потока активной воронки, которая колебалась от  $7 \cdot 10^{-3}$  до  $4,6 \cdot 10^5$  кВт. Вынос пара и газов изменялся от 21,6 кг/сут до  $4,8 \cdot 10^4$  т/сут.

Активизация вулкана началась в конце января, и с этого времени в г. Северо-Курильске практически непрерывно ощущался сильный запах сероводорода.

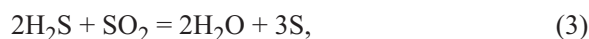
Сероводород, или сернистый водород ( $H_2S$ ) — бесцветный газ с характерным неприятным запахом, тяжелее воздуха, малорастворим в воде (сероводородная вода). Водный раствор сероводорода на свету мутнеет вследствие выделения серы. В смеси с воздухом взрывоопасен, ядовит. Содержится в вулканических газах, нефтяном газе, в минеральных источниках, образуется при разложении белковых веществ. На воздухе сероводород горит синим пламенем:



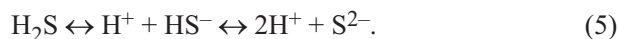
формула реакции горения при недостатке кислорода имеет вид



Сероводород является энергичным восстановителем:



Водный раствор сероводорода имеет слабокислую реакцию и представляет собой двухосновную кислоту:



Сероводородная кислота образует соли — сульфиды.

### **Влияние парогазовых выбросов вулкана Эбеко**

До сих пор высказывалось мнение о том, что опасность загрязнения атмосферного воздуха токсичными газами при извержениях вулкана Эбеко хотя и существует, но мала из-за большой повторяемости сильного ветра (Меняйлов и др., 1992). Кроме того, для зимнего периода не учитывались свойства снега, его адсорбция и высокая газопроницаемость. В зависимости от интенсивности силового поля на поверхности кристаллов снега могут при разных внешних условиях образовываться адсорбированные слои газов. Высокая газопроницаемость снежного покрова, в свою очередь, связана с разветвленной системой сообщающихся пор. Она распространяется как по горизонтали, так и по вертикали, хотя и в разной степени, зависит от пористости и слоистости снега, возрастает по мере укрупнения зернистости и прекращается лишь в случае образования ледяных прослоек. Эти свойства снежных кристаллов со значительной адсорбционной поверхностью и самой толщи снежного покрова с момента активизации вулкана фактически определили наличие постоянного загрязнения сероводородом атмосферного воздуха. Сероводород может накапливаться в снеге и возвращаться в атмосферу.

Для изучения содержания в атмосфере Северо-Курильска сероводорода были проведены наблюдения за концентрацией этой примеси при активизации вулкана в период с 27 января по 30 апреля 2005 г. Пробы воздуха отбирались каждый час и анализировались в химической лаборатории Южно-Сахалинска в соответствии с РД 52.04-186-89 (Ру-

ководство, 1991). Одновременно измерялись скорость и направление ветра. Опасными для города направлениями ветра являются западное и северо-западное со стороны вулкана.

Характер загрязнения воздуха Северо-Курильска сероводородом в период наблюдений представлен на рис. 1—3. В январе средняя концентрация сероводорода превысила ПДК в 180 раз. За рассматриваемый период концентрация сероводорода не опускалась ниже 20 ПДК, а 27—29 января — колебалась в пределах 260—270 ПДК. За период наблюдений зафиксировано восемь пиков, превышающих 65 ПДК. Все пики регистрировались при ветре со стороны вулкана.

Одновременно производился отбор проб снега вдали от извержения, за пределами г. Северо-Курильска, чтобы влияние города было исключено. Общий химический анализ свежеснегавшего снега проводился в лаборатории Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Результаты представлены в табл. 2. Для определения изменений в химическом составе были привлечены данные из работы Овсянникова для свежеснегавшего снега вдали от района извержения (среднее из четырех проб).

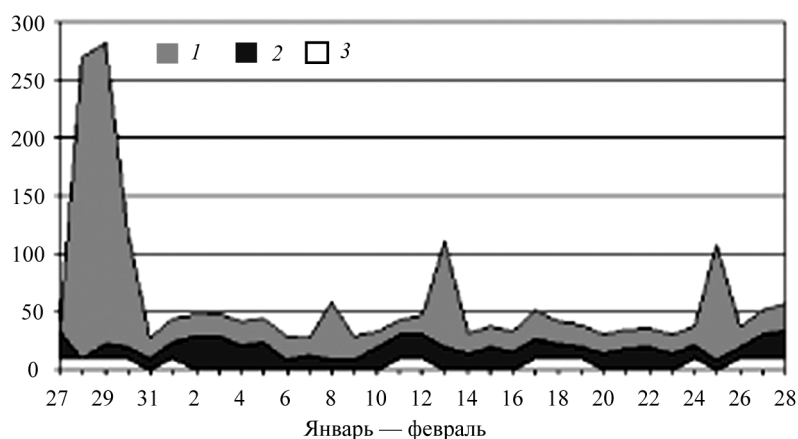


Рис. 1. Загрязнение атмосферы г. Северо-Курильска сероводородом в январе — феврале 2005 г.

1 — превышение ПДК по сероводороду (число ПДК), 2 — скорость ветра в порывах (м/с), 3 — сопутствующее направление ветра (град.) или штиль.

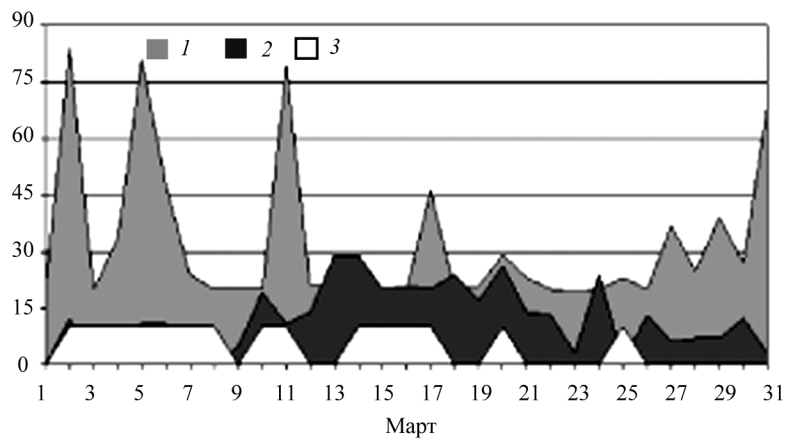


Рис. 2. Загрязнение атмосферы г. Северо-Курильска сероводородом в марте 2005 г.

Усл. обозначения см. рис. 1.

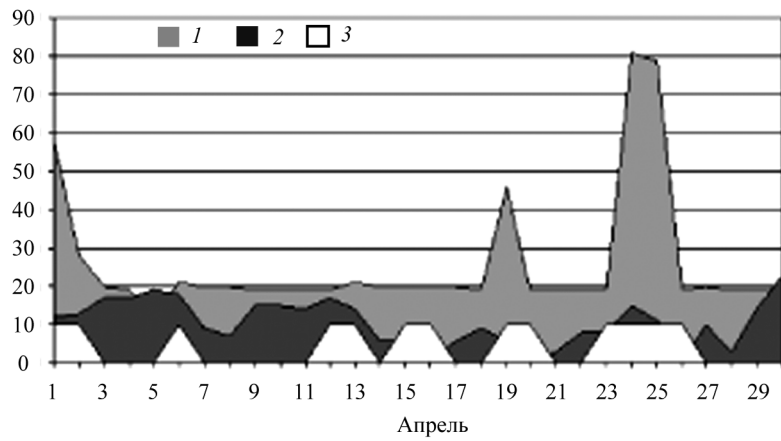


Рис. 3. Загрязнение атмосферы г. Северо-Курильска сероводородом в апреле 2005 г.

Усл. обозначения см. рис. 1.

Таблица 2

**Результаты химического анализа проб снега до и во время активизации  
вулкана Эбеко в окрестностях г. Северо-Курильска**

Компонент	Дата отбора пробы снега					
	02.1986	10.02.2005	19.02.2005	8.03.2005	22.03.2005	30.03.2005
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,2	1,2	2,4	2,4	3,7	
Cl <sup>-</sup>	8,3	53,2	21,3	5,7	1,4	13,5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4,92	7,7	5,7	2,4	1	2,9
F <sup>-</sup>	0,1	0,1	0,15	0,08	0,07	0,04
Σ анионов	15,43	62,2	29,55	10,6	6,11	16,44
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Na <sup>+</sup>	5,95	24,3	9,7	3	0,9	5,8
K <sup>+</sup>	0,36	0,6	1	0,4	0,1	0,4
Ca <sup>2+</sup>	0,92	2	1,6	0,8	0,8	1,2
Mg <sup>2+</sup>	0,74	3,4	1,4	0,2	0,2	1
Fe <sup>2+</sup>			<0,3	<0,3	<0,3	
Fe <sup>3+</sup> общ			<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
Al <sup>3+</sup>		<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
Σ катионов	7,97	30,3	13,7	4,47	2,03	8,4
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,5	<0,6	<0,6	<0,5	<0,5	<0,6
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> раств.	2,4	4,6	4,9	<2	<2	<2
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> колл.		<0,2	0,3	<2	<2	<2
pH	5,04	4,6	5,33	4,36	5,3	4,82
Общая минерализация	26,4	97,1	48,45	20	10	24,9

Как видно из полученных данных, по химическому составу пробы свежеснег выпавшего снега (проба за 22 марта) мало отличаются от фоновых. В пробах за 10 и 19 февраля 2005 г., перед отбором которых свежий снег в больших количествах не выпадал, наблюдается увеличения содержания хлорид-иона, сульфат-иона и целого ряда основных катионов (кальций, натрий, магний, калий), а соответственно и увеличение общей минерализации снега. Наблюдается увеличение кислотности.

Самая кислая проба была отобрана 8 марта. С 1 по 8 марта сохранялся западный, северо-западный ветер, выпадал мокрый снег. Дважды наблюдались высокие уровни загрязнения сероводородом, превышающие 75 ПДК — сказалось вовлечение вулканических газов формирующейся кучево-дождевой облачностью. Неоднократно отмечалось усиление запаха сероводорода во время снежных зарядов.

### Заключение

В настоящее время много говорится об антропогенном загрязнении атмосферы и негативном влиянии промышленных выбросов на здоровье человека. Однако в ряде случаев отрицательное воздействие природных источников загрязнения атмосферы на человека и окружающую среду многократно превосходит антропогенное воздействие. На территории Сахалина мониторинг сероводорода в атмосферном воздухе проводится в шести населенных пунктах: Южно-Сахалинске, Корсакове, Поронайске, Александровске-Сахалинском, Охе, Ново-Александровке. На протяжении многих лет средние концентрации сероводорода не превышают ПДК. Единственным городом, где фиксируются концентрации более 1 ПДК, является г. Оха (Ежегодник, 2006), но даже здесь содержание сероводорода практически никогда не превышает 3 ПДК. Очевидно, что влияние вулканической активности во много раз превышает влияние антропогенной деятельности.

Опасность, которой подвергаются жители Северо-Курильска, очевидна, поэтому наблюдения за содержанием сероводорода в атмосферном воздухе должны проводиться регулярно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ежегодник состояния загрязнения атмосферного воздуха городов на территории деятельности Сахалинского УГМС за 2005 год, 2006. — Южно-Сахалинск. — 111 с.

Мелекесцев И. В., Двигало В. Н., Кирьянов В. Ю. и др., 1993. Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч.2. — Вулканология и сейсмология, № 4, с. 24—41.

Меняйлов И. А., Никитина Л. П., Будников В. А., 1992. Активность вулкана Эбеко в 1987—1991 гг. Характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильска. — Вулканология и сейсмология, № 5—6, с. 21—33.

Нехорошев А. С., 1960. Геотермические условия и тепловой поток вулкана Эбеко. — Бюл. вулк. станций, № 29, с. 38—46.

Овсянников А. А., Муравьев В. Д., 1992. Извержение вулкана Чикурачки в 1986 г., 1987. — Вулканология и сейсмология, № 5—6, с. 3—20.

Рабинович В. А., Хавин З. Я., 1978. Краткий химический справочник. — Л.

Руководство по контролю загрязнения атмосферы, 1991. РД 52. 04-186-89 — Л.: Гидрометеиздат. — 691 с.

Федотов С. А., 1982. Оценки выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков. — Вулканология и сейсмология, № 4, с. 3—28.



УДК 551.582

**ОЦЕНКА РИСКА, СОЗДАВАЕМОГО СМЕРЧАМИ, ДЛЯ  
ВОЛГОДОНСКОЙ АЭС**

*Л. П. Галук<sup>1</sup>, Н. А. Самолетова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

<sup>2</sup> Северо-Кавказское УГМС

*На примере Волгодонской АЭС (Ростовская область) рассматривается метод расчета вероятности прохождения смерча через станцию и обусловленный им риск. Вероятность возникновения смерчеопасного события рассчитывается в пределах территории 1000 км вокруг АЭС. Для оценки риска используются данные о ВВП и числе людей, попадающих в область действия смерча.*

**THE ESTIMATION OF WHIRLWIND RELATED RISK FOR  
THE VOLGODON NUCLEAR POWER STATION**

*L. P. Galuk<sup>1</sup>, N. A. Samoletova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Voeikov Main Geophysical Observatory

<sup>2</sup> Severo-Kavkazskoe АНЕМ

*The method of probability estimation of whirlwind passing through the nuclear power station and the related risk are considered of Volgodon nuclear power station. The probability of whirlwind arising is calculated for the territory of 1000 km around the nuclear power station. For the risk estimation the information of GDP and amount of population in the endangered region are used.*

Учет экстремальных метеорологических воздействий, и прежде всего связанных со смерчами, шквалами, ураганами, является необходимым элементом обеспечения надежности и безопасности функционирования объектов экономики.

Территория Ростовской области, на которой расположена Волгодонская АЭС, является одним из смерчопасных районов. Именно смерчи представляют наибольшую опасность для данной АЭС.

Важной задачей при проектировании, а также при продлении сроков эксплуатации АЭС является правильная оценка рисков, создаваемых смерчами. Риск должен быть незначительным (пренебрежимым) (Быков и др., 2004), т. е. должна быть обеспечена безопасность и одновременно приемлемая стоимость АЭС. Одним из двух компонентов риска является угроза смерча, измеряемая его вероятностью. Применительно к атомным станциям, являющимся объектами повышенной опасности, Госатомнадзором разработана методика оценки угрозы смерчей. Однако эта методика обладает некоторыми неточностями, приводящими к ошибкам в вычислениях и завышению необходимой прочности объектов.

Методика оценки вероятности смерчей и рисков, разработанная авторами, основана на аналогичном принципе расчета вероятности прохождения смерча через определенную территорию как соотношения площади, охватываемой смерчами, и площади смерчопасного района, в котором находится АЭС. Этот же принцип был ранее использован в работе Кобышевой и др. (2001).

Особенностями предлагаемой методики являются, во-первых, расчет вероятности прохождения смерча через конкретную площадку расположения АЭС и хозяйственную зону вокруг нее, а не через любую площадку на территории смерчопасного района и, во-вторых, новая методика оценки уязвимости АЭС и выражения ее в виде стоимости возможного ущерба. Пример расчета риска, создаваемого смерчами для Волгодонской АЭС, иллюстрирует данную методику. При вычислениях вероятности прохождения смерчей через Волгодонскую АЭС используются характеристики самых опасных смерчей, зафиксированных за весь период наблюдений с 1844 по 2005 г. в смерчопасном районе, в котором расположена АЭС, и близлежащих районах с аналогичными физико-географическими условиями.

Таким образом, результаты расчетов получены с максимально возможным запасом надежности, который должен гарантировать целостность защитных конструкций реактивного отделения, а также защиты конструкции спецкорпуса и других объектов хозяйственной зоны вокруг АЭС.

Введем следующие обозначения:

$S$  — суммарная площадь возможных разрушений (т. е. площадь общего числа смерчей различной интенсивности, возможных в рассматриваемом смерчеопасном районе);

$S_A$  — площадь смерчеопасного района;

$S_{AЭС}$  — площадь территории основного производства АЭС, принятая равной 1 км<sup>2</sup>;

$P_A$  — вероятность прохождения смерча через смерчеопасный район;

$P_{S_{AЭС}}$  — вероятность прохождения смерча через площадку АЭС (1 км<sup>2</sup>).

В смерчеопасном районе, включающем Ростовскую область, наблюдались смерчи нулевого, первого и второго классов по шкале Фуджита (Борисенко, 1986).

Максимальная площадь смерча класса  $k$  ( $S_k$ ) определяется как произведение длины пути смерча  $L$  (км) на ширину пути смерча  $W$  (м) соответствующего класса интенсивности:

$$S_k = L_k W_k. \quad (1)$$

Период постоянных наблюдений за смерчами ( $T$ ) составляет 26 лет. Площадь смерчей наблюдавшихся классов интенсивности рассчитывалась по формуле (1):

$$S_0 = L_0 W_0 = 3 \cdot 0,1 = 0,3 \text{ км}^2,$$

$$S_1 = L_1 W_1 = 30 \cdot 0,3 = 9,0 \text{ км}^2,$$

$$S_2 = L_2 W_2 = 80 \cdot 0,6 = 48,0 \text{ км}^2.$$

Максимальная площадь смерча определяется по формуле:

$$S = \sum_0^2 (n_k \alpha_k S_k), \quad (2)$$

где  $n_k$  — число случаев;  $\alpha$  — коэффициент, увеличивающий число смерчей за счет возможно незарегистрированных слабых смерчей:  $\alpha = 3$  для  $k = 0$  и  $k = 1$  и  $\alpha = 1$  для  $k = 2$ .

Характеристики смерчей для Ростовской области приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Характеристики смерчей различных классов

$k$	$n_k$	$\alpha$	$L_k$ км	$W_k$ км	$S$ км <sup>2</sup>
0	1	3	3	0,1	0,9
1	3	3	30	0,3	81,0
2	3	1	80	0,6	144,0
3	7	—	—	—	225,9

Рассчитанная по формуле (2) общая (суммарная) площадь всех смерчей, наблюдавшихся за 26 лет,  $S$  составила 225,9 км<sup>2</sup>.

Вероятность смерча в смерчеопасном районе определяется по формуле

$$P_A = \frac{S}{TS_A}. \quad (3)$$

В рассматриваемом случае  $S_A = 534 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>, и, следовательно,

$$P_A = 225,9 : (26 \cdot 534 \cdot 10^3) = 1,6 \cdot 10^{-5}.$$

Вероятность прохождения смерча через площадку АЭС описывается формулой:

$$P_{S_{AЭС}} = (S_{AЭС}/S_A) \cdot P_A, \quad (4)$$

и, таким образом,  $P_{S_{AЭС}} = 1 : (534 \cdot 10^3) \cdot 1,6 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 10^{-11}$ .

Вероятность прохождения смерча через площадь 1000 км<sup>2</sup>, внутри которой располагается АЭС, составляет:  $P_{AЭС} = 3 \cdot 10^{-8}$ .

Вероятность угрозы, создаваемой смерчем, для Волгодонской АЭС получилась малой.

Для определения риска необходима дополнительная оценка ущерба. Социальный ущерб может быть определен как число людей, попавших в зону возможных разрушений, связанных с прохождением смерча. Число жителей в Ростовской области составляет  $4,4 \cdot 10^6$  человек. Площадь области равна  $10^5$  км<sup>2</sup>. На территорию, равную 225,9 км<sup>2</sup>, приходится около 10 000 жителей за 26 лет и 380 жителей за 1 год. Если считать, что люди, попавшие в смерч, погибли, а исчезнувшая доля ВВП, приходившаяся на каждого из них, составляет примерно

200 000 руб., то нижняя граница экономического ущерба в данном случае равна 76 млн. рублей. Таким образом, риск возможного ущерба величиной не менее 76 млн. рублей составляет  $10^{-8}$ , в то время как допустимый риск принят равным  $10^{-4}$ . Оценить полный экономический ущерб в случае разрушения АЭС практически невозможно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисенко М. Н., 1986. Торнадо, смерчи, тромбы. — Человек и стихия, с. 69—70.

Быков А. А., Акимов В. А., Фалеев М. И., 2004. Нормативные экономические модели управления рисками. — Проблемы анализа риска, т. 1, №2, с. 125—137.

Кобышева Н. В., Кобышев Е. А., 2001. Районирование территории России по степени опасности возникновения смерчей. — Природные опасности России. Т. 5. Гидрометеорологические опасности, с. 165—167.

**Памяти Ильи Моисеевича Имянитова  
(1918—1987)**

*К 90-летию со дня рождения*

Илья Моисеевич Имянитов — известный российский ученый-геофизик, доктор физико-математических наук, профессор, внес неоценимый вклад в становление и развитие исследований атмосферного электричества в свободной атмосфере.

И.М. Имянитов родился 14 марта 2008 г. в Торжке. В 1921 г. его семья переехала в Петроград. В 1940 г. он закончил Ленинградский политехнический институт по специальности «экспериментальная физика» и был направлен на работу на Кировский завод в качестве инженера-исследователя.

С первых дней Великой Отечественной войны Илья Моисеевич, вступив в ряды народного ополчения, воевал на Ленинградском фронте. В октябре 1941 г. он был ранен и зиму 1941-42 г. провел в госпитале в блокадном Ленинграде, а затем был вывезен в Свердловск. После демобилизации в 1943 г. он поступил на работу в Главную геофизическую обсерваторию (ГГО). С этого момента вся его дальнейшая трудовая и научная деятельность оказалась неразрывно связанной с ГГО.

С 1945 по 1948 г. И. М. Имянитов был аспирантом Я. И. Френкеля, под руководством которого разработал электростатический флюксметр — прибор для измерения напряженности электрического поля в различных метеорологических условиях. Конструкция флюксметра оказалась столь удачной, что он практически в неизменном виде применяется до настоящего времени (изменились лишь элементная база и принципы построения измерительной схемы).

С середины 40-х и до конца 60-х годов XX века И.М.Имянитов активно занимался приборостроением. Вместе со своими учениками он создал аппаратуру для исследования параметров атмосферного электричества: наземные, самолетные и ракетные электростатические флюксметры, прибор для измерения зарядов и размеров частиц осадков, комплекс аппаратуры для изучения статической электризации самолетов. Опубликованная им в 1957 г. монография «Приборы и методы для изучения электричества атмосферы» получила высокую оценку у специалистов.

Значительный цикл работ И. М. Имянитова посвящен исследованию электрического строения облаков. Методом прямого самолетного зондирования были исследованы конвективные (включая мощные кучевые и грозовые) и слоистые облака, а также заряжаемость самолетов различных типов. И. М. Имянитова всегда интересовали вопросы происхождения электрического поля атмосферы, электризации облаков и летательных аппаратов. Еще в 1958 г. он предложил универсальную схему электризации частиц осадков и впоследствии распространил ее на электризацию самолетов. Результаты работ этого направления представлены в монографиях «Электризация самолетов в облаках и осадках» (1970), «Электричество облаков» (1971), «Электричество свободной атмосферы» (1965).

В период Международного геофизического года И. М. Имянитов стал одним из инициаторов проведения в СССР масштабных исследований атмосферного электричества. В этот период была организована сеть наблюдений за атмосферным электричеством в приземном слое и Центр данных по атмосферному электричеству. И. М. Имянитов занимался регулярными наблюдениями за атмосферным электричеством около 10 лет начиная с середины 1950-х годов. В период 1958—1970 гг. он организовал в Киеве, Ленинграде и Ташкенте самолетное зондирование электрического поля атмосферы.

В последние годы внимание И. М. Имянитова привлекали вопросы развития метеорологии с позиции экономики. Для оценки эффективности метеорологических мероприятий он предложил метод метеорологического фильтра и показал возможность применения этого метода на примерах решения некоторых частных задач, связанных с влиянием атмосферного электричества на авиацию. Результаты этих работ были опубликованы в брошюре «Метод оценки экономической эффективности метеорологических мероприятий и его приложения» (1985).

И. М. Имянитова отличало умение выделять глубинные процессы, лежащие в основе явлений, отбрасывать все несущественное, второстепенное, обусловленное привходящими обстоятельствами. На всех этапах своей научной деятельности он последовательно проводил в жизнь следующую программу работ: создание комплекса аппаратуры для измерения атмосферного электричества в сложных метеорологических условиях; проведение летных исследований строения электрического

поля в свободной атмосфере и электрической структуры слоистых, конвективных и грозовых облаков; обобщение результатов летных исследований; разработка представлений о механизмах электризации облаков; проведение лабораторных и натурных экспериментов с воздействием на облака; практическое использование результатов исследований для улучшения метеорологического обеспечения авиации; исследование электризации летательных аппаратов; рассмотрение вопросов экономической эффективности метеорологических мероприятий.

И. М. Имянитов принимал активное участие в проводившихся в СССР симпозиумах, конференциях, семинарах, посвященных проблемам атмосферного электричества, физики облаков и осадков. Он всегда щедро делился своими знаниями и опытом и многое сделал для создания творческих научных коллективов в Киеве, Тбилиси, Кирове, Нальчике, Петропавловске-Камчатском и других городах. Он неоднократно был редактором научных и научно-популярных изданий, часто привлекался в качестве эксперта к решению разнообразных технических вопросов, не имевших прямого отношения к его специальности.

Будучи человеком разносторонне одаренным, И. М. Имянитов успевал заниматься разнообразной научно-общественной деятельностью: писать рассказы, в том числе для детей, выступать по телевидению, участвовать в составлении статей для энциклопедий.

И. М. Имянитов скончался 26 января 1987 г. Память о нем навсегда сохранится в сердцах тех, кому довелось встречаться с ним на жизненном пути.



## Михаил Михайлович Борисенко

### *К 75-летию со дня рождения*

19 июня 2008 г. исполняется 75 лет одному из старейших климатологов России Михаилу Михайловичу Борисенко.

Михаил Михайлович родился в 1933 г. в Ленинграде в семье врачей. Начало Великой Отечественной войны застало его семью в Минске. Отец в то время был кадровым офицером и всю войну провел на фронте.

Окончив школу в Минске, М. М. Борисенко поступил на географический факультет Ленинградского государственного университета им. Жданова, по окончании которого в 1956 г. получил специальность географа-климатолога и был направлен на работу в Сибирь. В течение шести лет он работал сначала в Западно-Сибирском УГМС и Сибирском отделении Академии строительства и архитектуры СССР в Новосибирске, а затем геодезистом в Сибирском НИИ геологии, геофизики и минерального сырья. В этот период он занимался геологоразведочными работами по поиску нефтегазовых месторождений и участвовал в крупных экспедициях в Забайкалье, Красноярском крае, Днепропетровской области, Кузбассе и на Кольском полуострове.

С 1962 по 1964 г. М. М. Борисенко учился в аспирантуре в ЛГУ, по окончании которой защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование влияния метеорологических факторов на точность барометрического нивелирования». В 1965 г. М. М. Борисенко поступил на работу в Главную геофизическую обсерваторию им. А. И. Воейкова, где прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией и ведущего научного сотрудника. В 1985 г. М. М. Борисенко защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора географических наук на тему «Климатические параметры ветровой нагрузки». Защита состоялась в Институте геологии и геофизики СО АН СССР (1991).

Научные интересы М. М. Борисенко сконцентрированы на работах по климатическому обеспечению строительного проектирования и задач ветроэнергетики. За время работы он опубликовал около 100 научных работ, в том числе вызвавшие большой интерес у климатологов и энергетиков монографии «Вертикальные профили ветра и температу-

ры в нижних слоях атмосферы» (1974), «Распределение ветра в нижнем 200-метровом слое атмосферы над городом» (1977), «Атлас ветрового и солнечного климатов России» (1997), «Атлас ветров России» (2000).

За успехи в научной деятельности Михаил Михайлович многократно поощрялся администрацией ГГО и руководством Росгидромета. За вклад в развитие прикладной климатологии и внедрение результатов исследований в практику он награжден серебряной медалью ВДНХ СССР (1984 г.) и нагрудным знаком «Почетный работник Гидрометеослужбы России» (1998 г.).

М. М. Борисенко продолжает активно работать, участвует в проведении широкого цикла научно-прикладных климатологических исследований.

Коллектив Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова поздравляет Михаила Михайловича Борисенко с юбилеем и желает ему здоровья, бодрости и благополучия на многие годы.

## Кусиэль Соломонович Шифрин

### *К 90-летию со дня рождения*

26 июля 2008 г. исполняется 90 лет со дня рождения доктора физико-математических наук, профессора Кусиэля Соломоновича Шифрина — выдающегося физика-теоретика, специалиста в области оптики атмосферы и океана. Профессор Шифрин является создателем нового направления гидрометеорологической науки — пассивной микроволновой радиотеплолокации, получившей ныне широкое практическое использование в качестве одного из основных инструментов спутникового земледения.

К. С. Шифрин родился в г. Мстиславле (Белоруссия). Обучение в ЛГУ он начал на рабфаке, а затем продолжил его сразу на двух факультетах — физическом и механико-математическом.

В 1940 г. К. С. Шифрин поступил в аспирантуру Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ) и стал специализироваться в области теоретической физики под руководством выдающегося физика, члена-корреспондента АН СССР Я. И. Френкеля.

В августе 1941 г. ЛФТИ был эвакуирован в Казань. Аспирант К.С. Шифрин сочетал учебу с работой на оборонных предприятиях, где выполнял прикладные гидрометеорологические, оптические и радиофизические исследования. Ему удалось выполнить ряд теоретических исследований и в 1943 г. подготовить кандидатскую диссертацию. Его фундаментальная работа «К теории электрических свойств сильно проводящих полупроводников», опубликованная в 1944 г. в «Журнале технической физики», получила мировое признание и цитируется до настоящего времени.

В 1943—1944 гг. К. С. Шифрин работал на кафедре физики Ленинградской военно-воздушной академии им. Можайского, находившейся тогда в г. Йошкар-Ола, затем, до конца 1945 г., преподавал на кафедре физики Казанского авиационного института.

В 1946 г., вернувшись в Ленинград, К. С. Шифрин поступает в Главную геофизическую обсерваторию им. А. И. Воейкова, где вначале работает в отделе прикладной метеорологии, а затем становится заведующим лабораторией в отделе радиационных исследований. В этот

период он активно занимается решением прямых и обратных задач, связанных с рассеянием электромагнитных волн частицами. Результаты фундаментальных исследований в этой области были опубликованы в 1951 г. в монографии «Рассеяние света в мутной среде». В том же году на Ученом совете Государственного оптического института К. С. Шифрин защитил докторскую диссертацию.

В ГГО К. С. Шифрин занимался развитием теории рассеяния волн, исследованием распространения в атмосфере видимой, инфракрасной и микроволновой радиации, кинетикой образования облаков, разработкой радиационной модели безоблачной и облачной атмосферы, теорией наклонной видимости и яркости, атмосферным аэрозолем, атмосферным электричеством, радиолокационной метеорологией.

В 1964—1967 гг. К. С. Шифрин теоретически обосновал метод пассивной радиолокации, в основу которого была заложена идея использования теплового излучения для СВЧ пассивного зондирования системы Земля—атмосфера. Этот признанный ныне во всем мире метод дистанционной диагностики различных форм подстилающей поверхности позволяет производить аэрокосмический мониторинг природных сред независимо от наличия облачности, осуществлять фиксацию параметров состояния самой атмосферы.

Результаты этих исследований, выполненных в ГГО под руководством К. С. Шифрина, в 1968 г. были опубликованы в работе «Перенос микроволнового излучения в атмосфере» (Труды ГГО, вып. 222). Это издание было немедленно переведено на английский язык и опубликовано за границей, вызвав большой интерес мировой научной общественности. Всего же за годы работы в ГГО (1946—1969) К. С. Шифрин опубликовал свыше 190 научных работ.

Наряду с работой в ГГО К.С. Шифрин вел активную преподавательскую деятельность в Ленинградском гидрометеорологическом институте (ныне РГГМУ) и Лесотехнической академии.

В 1969 г. К. С. Шифрин был приглашен на работу в Ленинградское отделение Института океанологии АН СССР (ИОАН). В ИОАН он сосредоточился на изучении оптики океана, решении проблем дистанционного зондирования морских акваторий. В эти годы им был разработан метод определения концентрации и среднего размера частиц взвеси (в частности, хлорофилла), изучены особенности радиотеплолокации нефтяных пленок на спокойной и взволнованной морской

поверхности и др. Мировое признание получила подготовленная им в этот период монография «Введение в оптику океана» (Л., Гидрометеодиздат, 1983).

С конца 1992 г. К. С. Шифрин работает в США в Орегонском университете, однако продолжает активное научное сотрудничество со многими ведущими российскими научно-исследовательскими центрами.

Профессор Шифрин относится к категории ученых, внесших выдающийся вклад в отечественную и мировую науку. Его высочайшая квалификация признана мировым научным сообществом: он является членом Международного геофизического союза, Российского оптического общества, Российского физического общества, Итальянской геофизической ассоциации, действительным членом Американского оптического общества и др.

За годы своей научной деятельности К. С. Шифрин опубликовал свыше 400 научных работ в области гидрометеорологии, дистанционного зондирования, физики атмосферы и океана. Он является научным редактором более 20 книг и монографий.

Профессора Шифрина отличает высокий уровень культуры и эрудиции в самых различных областях знаний, в литературе, поэзии, музыке. Ученики и коллеги Кусиэля Соломоновича, работавшие с ним в ГГО и других научных институтах, с любовью и теплотой вспоминают этого умного, щедрого и доброжелательного человека.

## Георгий Георгиевич Щукин

### *К 70-летию со дня рождения*

25 августа 2008 г. исполняется 70 лет ведущему ученому в области дистанционного зондирования, радиометеорологии и распространения радиоволн заместителю директора Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, директору филиала ГГО — Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы, заслуженному деятелю науки Российской Федерации и Кабардино-Балкарской Республики, профессору, доктору физико-математических наук Георгию Георгиевичу Щукину.

Г. Г. Щукин начал работать в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова по окончании в 1961 г. радиотехнического факультета Ленинградского института точной механики и оптики. Начало научной деятельности Г. Г. Щукина совпало с тем временем (1964 г.), когда в СССР была поставлена новая задача по исследованию возможностей применения микроволнового излучения для получения информации о состоянии атмосферы и земных покровов. В рамках работ этого направления Г. Г. Щукиным были выполнены теоретические и экспериментальные (наземные и самолетные) исследования по определению интегрального содержания водяного пара в атмосфере по собственному радиотепловому излучению, результаты которых послужили основой его кандидатской диссертации, успешно защищенной в 1967 г. Разработанные при непосредственном участии Г. Г. Щукина самолетные методы СВЧ радиометрического определения характеристик атмосферы, облаков, осадков, водной поверхности и ледового покрова нашли применение при интерпретации данных, полученных с ИСЗ «Космос-24», запущенного на два года ранее аналогичного американского спутника.

С момента назначения Г. Г. Щукина в 1971 г. на должность заведующего отделом радиометеорологических исследований его научная деятельность направлена на развитие и внедрение наземных дистанционных методов зондирования атмосферы, проведение теоретических и экспериментальных исследований взаимосвязей между радиофизичес-

кими характеристиками и метеорологическими параметрами атмосферы. Г. Г. Щукиным и его учениками были впервые разработаны радиофизические модели атмосферы, связывающие между собой гигрометрические характеристики, определяющие характер развития основных атмосферных процессов, с параметрами собственного и рассеянного радиоизлучения.

Г. Г. Щукин является основателем и руководителем нового научного направления по определению метеорологических характеристик атмосферы и подстилающей поверхности на основе комплексного применения пассивно-активного радиолокационного метода (методов активной радиолокации и радиотеплолокации). Данный метод получил широкое применение в работах по контролю активных воздействий на метеорологические процессы, проведенных на полевой экспериментальной базе ГГО в Ленинградской области. Результаты этих работ обобщены в монографии «Радиотеплолокация в метеорологии» (1987).

Под руководством Г. Г. Щукина выполнен цикл теоретических и экспериментальных исследований распространения радиоволн в различных метеорологических условиях, в результате которых впервые установлена зависимость интенсивности радиотеплового излучения атмосферы от уровня рефракции. Полученные результаты, опубликованные в монографии «Радиометеорологические исследования над морем» (1990), были использованы для оценки эффективности судовых радионавигационных систем и влияния атмосферной рефракции на дальность их действия.

Научную деятельность Г. Г. Щукина отличает ее практическая направленность. Под его руководством в качестве главного конструктора проекта технического переоснащения Московской воздушной зоны разработана система метеообеспечения авиации, объединяющая подсистемы наземных метеорологических и радиолокационных и спутниковых наблюдений. Эта система внедрена в аэропорту Внуково и подробно описана в монографии под редакцией Г. Г. Щукина «Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации».

Возглавив в 1994 г. Научно-исследовательский центр дистанционного зондирования атмосферы, Георгий Георгиевич делает все возможное для обеспечения головной роли ГГО в области проведения испытаний и внедрения новых технических средств на сети Росгидроме-

та. Под его руководством активно развиваются работы по совершенствованию методов и средств дистанционного зондирования атмосферы, их комплексированию с целью усвоения их данных в региональных моделях сверхкраткосрочного прогноза погоды, развитию в Северо-Западном регионе России работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы.

Значительное внимание Г. Г. Шукин уделяет педагогической работе: он является профессором Российского государственного гидрометеорологического университета, членом нескольких диссертационных советов. Им подготовлено четыре доктора и 19 кандидатов наук.

Г. Г. Шукину принадлежит более 400 научных трудов, в числе которых десять монографий, обзоры и руководящие документы, 20 изобретений и патентов.

На протяжении ряда лет Г. Г. Шукин являлся сопредседателем подпроекта «Дистанционное зондирование» Рабочей группы российско-американского соглашения о сотрудничестве в области охраны окружающей среды, научным руководителем радиолокационных исследований тропических циклонов в рамках советско-вьетнамского сотрудничества, членом Рабочей группы по метеорологической радиолокации Комиссии ВМО по приборам и методам наблюдений, научным руководителем подспутниковых полигонных исследований в рамках Международной комплексной программы «Природа».

В настоящее время Г. Г. Шукин — председатель секции дистанционного зондирования атмосферы и земных покровов Научного совета РАН по комплексной проблеме «Распространение радиоволн», член Проблемного Научного совета Росгидромета по активным воздействиям и Научно-технического совета при Губернаторе Ленинградской области, заместитель председателя Ученого совета ГГО, председатель Научно-технического совета филиала ГГО НИЦ ДЗА.

Г. Г. Шукин награжден орденом «Знак Почета», нагрудным знаком «Почетный работник Гидрометслужбы России». Он — лауреат научной премии Губернатора Ленинградской области и Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук за заслуги в области дистанционного зондирования атмосферы и радиолокации. С 1999 г. возглавляемый им коллектив сотрудников и ряд подготовленных им докторов и кандидатов наук признаны одной из ведущих на-



учных школ России, развивающей активно-пассивные радиофизические методы получения метеорологической информации с поверхности Земли и с подвижных платформ.

Свое 70-летие Георгий Георгиевич встречает в расцвете творческих сил и планов. Коллектив Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова от души поздравляет Георгия Георгиевича с юбилеем, желает ему доброго здоровья, энергии и многих лет плодотворной деятельности на благо отечественной метеорологической науки.

## **Лев Рахмилович Сонькин**

### ***К 80-летию со дня рождения***

12 августа исполняется 80 лет известному ученому в области исследования и прогноза загрязнения атмосферного воздуха, ведущему научному сотруднику лаборатории моделирования и прогноза загрязнения атмосферы Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, доктору географических наук, профессору Льву Рахмиловичу Сонькину.

В 1952 г. Лев Рахмилович окончил Ленинградский гидрометеорологический институт и был призван в ряды Военно-Морского флота. После окончания в 1953 г. курсов при Военно-Морской академии им. А. Н. Крылова он служил в Камчатской флотилии Тихоокеанского военно-морского флота старшим офицером бюро гидрометобеспечения.

Начиная с 1960 г. научная, трудовая и общественная жизнь Льва Рахмиловича Сонькина связана с отделом исследований и мониторинга загрязнения атмосферы Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. В 1962 г. он закончил аспирантуру ГГО и защитил кандидатскую диссертацию. В 1984 г. Лев Рахмилович защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора географических наук на тему «Краткосрочное прогнозирование загрязнения атмосферы». В 2003 г. Льву Рахмиловичу присвоено звание профессора.

Л. Р. Сонькин сыграл определяющую роль в создании и развитии нового научного направления в системе Гидрометслужбы нашей страны — прогноза загрязнения атмосферного воздуха, которое является важной частью мониторинга загрязнения атмосферы. В процессе исследований были учтены основные закономерности распространения примесей в атмосфере и особенности влияния метеорологических условий на загрязнение воздуха в конкретных городах. Благодаря этому впервые удалось добиться хорошей оправдываемости прогнозов высоких уровней загрязнения воздуха. Результаты исследований нашли широкое применение в России и в республиках бывшего СССР. Работы по прогнозированию характеристик загрязнения воздуха регулярно проводятся в 250 городах России. Эти прогнозы учитываются при осуществлении производственных мероприятий по сокращению

выбросов вредных веществ в атмосферу при неблагоприятных метеорологических условиях. В настоящее время Лев Рахмилович принимает активное участие в научно-методическом руководстве указанными работами на сети Росгидромета.

Л. Р. Сонькин — автор более 150 научных работ, в том числе двух монографий («Зимние синоптические процессы района дальневосточных морей и прогнозы погоды на 3—7 дней» (1963), «Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы» (1991)), и ряда действующих методических документов, которые нашли широкое практическое применение.

В течение многих лет Л. Р. Сонькин принимает активное участие в международном сотрудничестве по метеорологическим аспектам загрязнения атмосферы.

Лев Рахмилович уделяет большое внимание подготовке научных кадров. Под его руководством подготовлено шесть кандидатов наук.

Л. Р. Сонькин является членом диссертационного совета ГГО. Длительное время он принимал участие в работе диссертационного совета Российского государственного гидрометеорологического университета.

Лев Рахмилович награжден медалями «Ветеран труда», «40 лет в вооруженных силах СССР», «К 300-летию Санкт-Петербурга». Ему присвоены звания «Отличник Гидрометслужбы» и «Почетный работник Гидрометслужбы».

В настоящее время доктор географических наук, профессор Л. Р. Сонькин продолжает активную творческую деятельность, занимаясь как решением научных задач, так и методическим руководством прогностическими работами в системе Росгидромета.

Коллектив сотрудников Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова желает Льву Рахмиловичу Сонькину на долгие годы доброго здоровья, неиссякаемой энергии и новых творческих успехов.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>В. М. Катцов, В. П. Мелешко.</i> Современные приоритеты фундаментальных исследований климата . . . . .	3
<i>В. М. Катцов, С. С. Чичерин.</i> Посткиотский период: позиции ключевых игроков . . . . .	20
<i>Е. И. Хлебникова.</i> Численные стохастические модели временных метеорологических рядов и их прикладные возможности . . . . .	34
<i>М. М. Борисенко, Е. О. Гобарова, Е. Л. Жильцова.</i> Оценки ветроэнергетических ресурсов на территории России . . . . .	53
<i>В. В. Стадник, Ю. В. Разгоняев.</i> Оценка суммарного прихода солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности . . . . .	67
<i>Л. М. Псаломщикова, И. А. Салль, В. В. Стадник, О. В. Трофимова.</i> Использование метеорологической информации в целях содержания автомобильных дорог в зимний период . . . . .	85
<i>В. Н. Морозов, Г. Г. Щукин.</i> Моделирование атмосферно-электрических процессов (глобальная электрическая цепь, электризация грозовых облаков) . . . . .	102
<i>Г. Г. Щукин, Д. М. Караваев.</i> Разработка критерия развития облаков и осадков с использованием наземных радиотеплокационных данных и радиолокационной информации . . . . .	119
<i>А. П. Бычкова, Ю. И. Казеев, В. И. Кривонощенко, Л. В. Луцько, С. А. Соколенко.</i> Новые приборы для актинометрических наблюдений на сети . . . . .	133
<i>В. М. Игнатенко.</i> Учет рассеяния радиации при градуировке озонметров М-124 . . . . .	147
<i>Э. Ю. Безуглая, И. А. Воробьева, Т. П. Ивлева, Е. Л. Махоткина.</i> Потепление как возможная причина повышения химической активности атмосферного воздуха городов . . . . .	159
<i>Р. И. Оникул, Е. А. Яковлева.</i> Аналитическая аппроксимация численного решения уравнения атмосферной диффузии тяжелой примеси . . . . .	184
<i>Т. В. Костарева, Л. Р. Сонькин.</i> Прогнозирование загрязнения воздуха в городе на три дня на основе численного метеорологического прогноза . . . . .	197
<i>И. А. Воробьева.</i> Исследование причин формирования повышенных концентраций формальдегида в атмосфере города . . . . .	206

<i>С. Ким, Э. Като, В. Е. Сучков, Т. А. Котенко, Л. В. Котенко. Загрязнение атмосферы Северо-Курильска сероводородом (остров Парамушир, Курильские острова).</i> . . . . .	216
<i>Л. П. Галюк, Н. А. Самолетова. Оценка риска, создаваемого смерчами, для Волгодонской АЭС</i> . . . . .	225
Памяти Ильи Моисеевича Имянитова . . . . .	230
Михаил Михайлович Борисенко . . . . .	233
Кусиэль Соломонович Шифрин . . . . .	235
Георгий Георгиевич Щукин . . . . .	238
Лев Рахмилович Сонькин . . . . .	242

Сборник научных трудов

**Труды ГГО, вып. 557**

Подписано в печать 5.06.2008. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 15,5. Тираж 300 экз.