

ISSN 2587-652X (0371-7089)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

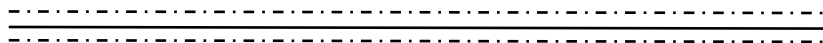
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
"ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"

**ТРУДЫ  
ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ**

(Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского  
центра Российской Федерации)

Выпуск 366

Под редакцией  
д-ра геогр. наук В.М. Хан



**PROCEEDINGS  
OF THE HYDROMETCENTRE OF RUSSIA**

Vol. 366 (2017)

Москва 2017

*Редакционная коллегия*

д-р техн. наук Р.М. Вильфанд (главный редактор);  
 д-р геогр. наук А.А. Васильев (заместитель редактора);  
 д-р физ.-мат. наук П.П. Васильев; д-р физ.-мат. наук А.Р. Иванова;  
 д-р геогр. наук И.Н. Кузнецова; д-р физ.-мат. наук А.В. Муравьев;  
 д-р геогр. наук Е.С. Нестеров; д-р физ.-мат. наук Г.С. Ривин;  
 д-р физ.-мат. наук Ю.Д. Реснянский; д-р физ.-мат. наук М.А. Толстых;  
 д-р геогр. наук В.М. Хан (секретарь редколлегии); д-р физ.-мат. наук Н.П. Шакина;  
 канд. геогр. наук С.В. Борщ; канд. геогр. наук А.И. Страшная;  
 д-р техн. наук М.В. Болгов; д-р геогр. наук Н.А. Зайцева; д-р геогр. наук Н.А. Калинин;  
 д-р геогр. наук А.Д. Клещенко; д-р геогр. наук А.Н. Полевой;  
 академик НАН Беларуси В.Ф. Логинов; член-корр. РАН и НАН Украины А.Б. Полонский;  
 канд. техн. наук Л.Р. Варданян, Армения; Dr. KRICHAK SIMON O., Kamea Research Professor, Israel

Выпуск журнала посвящен и приурочен к проведению 13-й сессии Северо-Евразийского климатического форума стран СНГ по сезонным прогнозам (СЕАКОФ-13). Обсуждается концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийских климатических форумов в ее реализацию. В журнал вошли статьи, в которых рассматриваются вопросы технологии выпуска детализированных глобальных вероятностных и детерминистических прогнозов на базе модели общей циркуляции атмосферы ПЛАН; результаты пятилетнего опыта оперативного прогнозирования ежедневных и месячных метеорологических параметров на основе модели общей циркуляции атмосферы ГГО; методика сезонного прогноза зимней фазы Арктической осцилляции (АО) с использованием теоремы Байеса; экспериментальной технологии выпуска предупреждений о неблагоприятных крупномасштабных метеорологических явлениях в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра; результаты проверочных и оперативных испытаний долгосрочного ансамблевого гидрологического прогноза. Тематика настоящего сборника также охватывает вопросы, связанные с исследованиями региональных особенностей короткопериодных колебаний климата и мониторингом климатической системы. Завершает коллекцию статей работа с описанием методики расчета климатической уязвимости территории на основе безразмерных климатических индексов.

Сборник рассчитан на специалистов, научных сотрудников, аспирантов и магистрантов, специализирующихся в области долгосрочного метеорологического прогнозирования и мониторинга климатической системы.

***Proceedings of Hydrometcentre of Russia***

*Edited by V.M. Khan*

This issue is dedicated and timed to the 13-th session of the North-Eurasian Climate Outlook Forum of the CIS countries (NEACOF-13). The introductory part provides overview of the concept of WMO regional climate outlook forums and the contribution of the North-Eurasian climate forums to its implementation. The journal includes articles which discuss the technology of issue of detailed global probabilistic and deterministic forecasts on the basis of the general circulation model SL-AV; the results of five years period of operational forecasting of weekly and monthly meteorological parameters based on the general circulation model of the MGO model; method of seasonal forecasting of the winter phase of the Arctic Oscillation (AO) using the Bayes theorem; experimental technology of climate watch warnings of possible anomalous large scale meteorological phenomena within the framework of the North-Eurasian Climate Center; results of author and operational testing of the long-term ensemble hydrological forecast. This issue also includes the articles focused on the research of regional characteristics of short-term climate variability and monitoring of the climate system. The collection of articles is completed with a description of the methodology for calculating the climatic vulnerability of the territory on the basis of dimensionless climatic indices.

This issue is intended for professionals, researchers, graduate students and undergraduates specializing in long-range weather forecasting and climate monitoring studies.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Хан В.М.</i> Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийского климатического форума в ее реализацию .....                                                                                                               | 5   |
| <i>Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М.</i> Выпуск детализированных метеорологических прогнозов в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) .....                 | 14  |
| <i>Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А.</i> Пятилетний опыт оперативного прогнозирования метеорологических условий на срок до 45 суток на основе модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-3 T63L25) .....                     | 29  |
| <i>Крыжов В.Н.</i> Байесовский подход к вероятностному прогнозу зимней фазы Арктической осцилляции .....                                                                                                                                               | 51  |
| <i>Ганиева Е.С., Хан В.М., Куликова И.А., Круглова Е.Н.</i> Экспериментальная технология выпуска предупреждений о неблагоприятных метеорологических явлениях в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) .....             | 57  |
| <i>Борщ С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А.</i> Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний ..... | 68  |
| <i>Булыгина О.Н., Кориунова Н.Н., Разуваев В.Н.</i> Мониторинг снежного покрова на территории Российской Федерации .....                                                                                                                               | 87  |
| <i>Лавров А.С., Хохлова А.В., Стерин А.М.</i> Мониторинг климатических параметров температуры и ветра в свободной атмосфере: технологические аспекты .....                                                                                             | 97  |
| <i>Гайнутдинова Р.Д., Крымская Д.Н.</i> Особенности частотного спектра долгопериодных изменений приземной температуры и параметров солнечной активности в регионе Кыргызской Республики .....                                                          | 112 |
| <i>Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д.</i> Роль различных физических факторов в долгопериодных изменениях приземной температуры .....                                                                                                                      | 121 |
| <i>Арушанов М.Л., Жумаев У.</i> Особенности пространственно-временного распределения климатической энергии циркуляции атмосферы в Северном и Южном полушариях .....                                                                                    | 137 |
| <i>Переведенцев Ю.П., Аль-Маамури С.К., Шанталинский К.М., Аухадеев Т.Р.</i> Пространственно-временные изменения климатических характеристик на территории Ирака в период 1979–2016 гг. ....                                                           | 145 |
| <i>Оганесян В.В.</i> Методика расчета климатической уязвимости территории на основе безразмерных климатических индексов .....                                                                                                                          | 158 |

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Khan V.M.</i> The concept of WMO Regional Climate Outlook Forum and the contribution of North Eurasia Climate Outlook Forum to its implementation .....                                                                                           | 5   |
| <i>Kiktev D.B., Tolstykh M.A., Zaripov R.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Tishenko V.A., Khan V.M.</i> Issue of detailed meteorological forecasts in North Eurasian Climate Centre (NEACC) .....                                                    | 14  |
| <i>Mirvis V.M., Meleshko V.P., Lvova T.Yu., Matyugin V.A.</i> Five years experience of operational forecasting meteorological conditions for up to 45 days based on the atmosphere general circulation model of the MGO (version MGO-3 T63L25) ..... | 29  |
| <i>Kryjov V.N.</i> Probabilistic prediction of the wintertime Arctic Oscillation phase based on the Bayes theorem .....                                                                                                                              | 51  |
| <i>Ganieva E.S., Khan V.M., Kulikova I.A., Kruglova E.N.</i> Experimental technology of issuing warnings about adverse climatic events within the framework of the North Eurasia Climate Center activity .....                                       | 57  |
| <i>Borsch S.V., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Motovilov Yu.G., Siminov Yu.A.</i> Long-term ensemble forecasting of spring inflow into the Cheboksary reservoir based on the hydrological model: results of operational testing .....                    | 68  |
| <i>Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N.</i> Monitoring snow cover on the territory of Russia .....                                                                                                                                          | 87  |
| <i>Lavrov A.S., Khokhlova A.V., Sterin A.M.</i> Monitoring of climate parameters of temperature and wind in the free atmosphere: technological aspects .....                                                                                         | 97  |
| <i>Gainutdinova R.D., Krymskaya D.N.</i> The peculiarities of frequency spectra of long-term changes of surface temperature and parameters of solar activity in the Kyrgyz Republic region .....                                                     | 112 |
| <i>Karimov K.A., Gainutdinova R.D.</i> Role of different physical factors in long-term changes of surface temperature .....                                                                                                                          | 121 |
| <i>Arushanov M.L., Zhumaev U.</i> Specific features of the spacial-temporal distribution of the atmosphere circulation climatic energy in the Northern and Southern hemispheres .....                                                                | 137 |
| <i>Perevedentsev Y.P., Al-Maamuri S.K., Shantalinskiy K.M., Auhadeev T.R.</i> Spacial-temporal changes of climatic characteristics on the territory of Iraq in the period 1979-2016 .....                                                            | 145 |
| <i>Oganesyan V.V.</i> Methodology of assessment of climatic vulnerability of a region on the basis of nondimensional climatic indices .....                                                                                                          | 158 |

УДК 551.5

## **КОНЦЕПЦИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФОРУМОВ ВМО И ВКЛАД СЕВЕРО-ЕВРАЗИЙСКОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ФОРУМА В ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЮ**

***В.М. Хан***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва  
khan@metcom.ru*

В статье приводится краткий обзор существующих международных инициатив под эгидой ВМО, направленных на создание и расширение концепции Региональных климатических форумов (РКОФ). Подробно рассматривается роль Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной инфраструктуре по климатическому обслуживанию через механизмы РКОФ. Обсуждаются возложенные задачи на СЕАКОФ и их выполнение.

*Ключевые слова:* Региональные климатические форумы, Северо-Евразийский климатический форум, климатическое обслуживание, консенсусные прогнозы.

### **Становление региональных климатических форумов ВМО**

Региональные климатические форумы (РКОФ) являются местом общения национальных, региональных и международных экспертов по климату и представителей заинтересованных сторон с целью выработки климатического прогноза на сезон по соответствующему региону (<https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/regional-climate-outlook-products>).

Климатический прогноз вырабатывается по результатам интерпретации прогнозов национальных метеорологических / гидрометеорологических служб (НМС/НГМС), региональных климатических центров ВМО (РКЦ), Глобальных центров производителей по долгосрочным прогнозам (ГЦП-ДП) и других организаций по исследованию и прогнозированию климата. Взаимодействие с различными пользователями, агентствами по распространению информации и представителями государственных органов позволяет РКОФ в ходе своих сессий проводить оценку последствий вероятных климатических аномалий для наиболее уязвимых социально-экономических секторов в интересующем регионе. Разрабатываемые стратегии управления климатическими рисками могут внести важнейший вклад в устойчивое развитие региона за счет оптимального использования климатической информации. РКОФ являются механизмом укрепления регионального сотрудничества между поставщиками услуг климатического

обслуживания и представителями пользователей, а также повышения квалификации кадровых ресурсов НМС/НГМС по вопросам климатического обслуживания.

Деятельность РКОФ началась в конце 1990-х годов в рамках проекта ВМО по системам климатической информации и прогнозированию в сотрудничестве с НМС/НГМС, региональными учреждениями и международными организациями. Первый РКОФ состоялся в 1996 году в г. Виктория-Фоллз (Зимбабве). До начала реализации концепции глобальных центров подготовки прогнозов и региональных климатических центров РКОФ служили первой платформой для глобального и регионального сотрудничества по разным аспектам климатического обслуживания. В дальнейшем значимость РКОФ под эгидой ВМО увеличилась, их деятельность приобрела всемирный характер. Необходимо подчеркнуть, что РКОФ является ключевым элементом в реализации Глобальной рамочной основы для климатического обслуживания (ГРОКО), координируемой ВМО в партнерстве с другими структурами ООН. Концепция РКОФ успешно реализуется в течение более 20 лет. На сегодняшний день на регулярной основе работают 19 форумов по всему миру (рис. 1). Вопрос создания еще одного Арктического регионального форума на данном этапе решается.

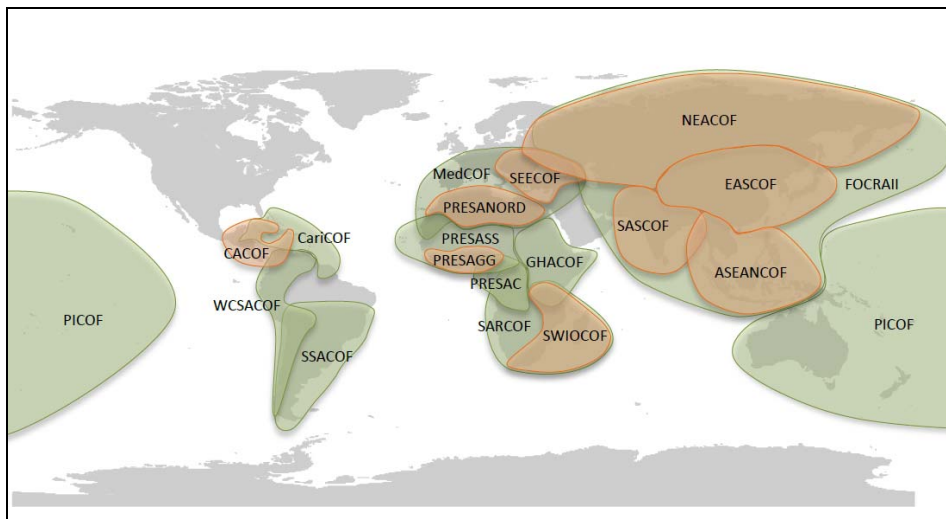


**Рис. 1.** Функционирующие РКОФ ВМО (с веб сайта ВМО).

### Деятельность РКОФ

Проводимые РКОФ в разных регионах мира имеют свои особенности, связанные с конкретными потребностями секторальных пользователей, возможностями разработчиков консенсусных прогнозов и местными экономико-географическими условиями. По сути результаты их деятельности

представляют собой наиболее надежные и достоверные источники климатической информации, полученной в результате совместной работы разных специалистов. Содержание, программа и особенности проведения форумов определяются интересами пользователей, в результате чего обеспечивается эффективность практического применения прогностической информации для удовлетворения потребностей социально-экономического сектора. РКОФ вносят значительный вклад в повышение качества сезонных метеорологических прогнозов, а также их доведение до конечных пользователей.

Программа РКОФ обычно включает следующие компоненты:

- учебный семинар по прогнозированию сезонного климата в целях повышения научно-технического потенциала национальных и региональных специалистов;

- совещание международных и региональных экспертов по климату для обзора и оценки информации, с учетом которой составляется обзор сезонных аномалий и разрабатывается консенсусный прогноз (как правило, в вероятностной форме);

- секция форума, на которой специалисты-климатологи представляют и интерпретируют доступные в режиме реального времени продукты сезонного прогнозирования Глобальных центров производителей сезонных прогнозов ВМО, Ведущего центра ВМО по мультимодельным ансамблевым прогнозам, Региональных климатических центров и прогнозы, составленные силами НГМС, а также оценивают качество систем прогнозирования и разрабатывают консенсусный прогноз для региона;

- обсуждение с секторальными пользователями возможностей практического применения продуктов РКОФ в соответствующих секторах.

В ходе сессий РКОФ практикуется также участие представителей средств массовой информации для разработки эффективных коммуникационных стратегий распространения прогнозов.

Важной частью работы РКОФ является критический анализ существующих недостатков и трудностей на пути использования климатической информации, а также извлечение уроков из прошлого опыта.

ВМО и другие международные, национальные и региональные организации оказывают постоянную поддержку в развитии и расширении деятельности РКОФ. Необходимо отметить особую роль сети РКЦ ВМО, охватывающей почти все регионы мира, в координации и технической поддержке форумов.

ВМО подчеркивает необходимость устойчивого функционирования РКОФ при минимизации зависимости от внешних ресурсов. Некоторые из РКОФ используют для проведения своих сессий субсидии национальных метеослужб и региональных фондов, другие же все еще нуждаются в поддержке через механизмы финансирования ВМО. Помимо прямой финансовой поддержки деятельности РКОФ, ВМО прилагает усилия к созданию ряда механизмов, обеспечивающих осуществление функций РКОФ в тесном взаимодействии с ГПЦ-ДПП.

## Глобальный обзор функционирования РКОФ

Особое внимание ВМО направлено на РКОФ в развивающихся странах и регионах, наиболее уязвимых по отношению к климатическим рискам. За последние два десятилетия именно в этих странах РКОФ приобрели наибольшую популярность как среди поставщиков, так и среди пользователей климатической информации, послужив наращиванию кадрового потенциала поставщиков и повышению осведомленности пользователей. Однако сохраняется острая потребность в повышении профессионального уровня специалистов и увеличении инфраструктурных возможностей. Нерешенными остаются и некоторые технические и методологические вопросы реализации РКОФ. В результате потребности пользователей зачастую удовлетворяются не в полной мере. С этим связана необходимость регулярного контроля и оценки деятельности РКОФ, включая технические аспекты.

С целью выявления и анализа основных трудностей и недостатков работы РКОФ, поиска способов их устранения и оптимизации их функционирования проводятся Международные совещания экспертов по обзору деятельности РКОФ (Global RCOF Review). Под эгидой ВМО были успешно реализованы два таких совещания в 2000 г. (г. Претория, ЮАР) и в 2008 г. (г. Аруш, Танзания). В ходе этих совещаний осуществлялся всесторонний анализ процесса РКОФ, участники обменивались опытом, рассматривались успешные практики, позволяющие решить существующие проблемы, и разрабатывались планы развития для дальнейшего улучшения работы РКОФ.

В результате Международного совещания 2008 года были подготовлены основополагающие документы, регламентирующие обязательные функции РКОФ: принципы взаимодействия с пользователями, рекомендации по верификации продуктов РКОФ, рекомендации по интеграции научных исследований в практику РКОФ, рекомендации по укреплению потенциала РКОФ и рекомендации по обеспечению устойчивого развития РКОФ. Однако с тех пор произошли значительные изменения в инфраструктуре выпуска климатической информации, технологиях и научных основах выпуска долгосрочных прогнозов. Кроме того, эксперты Комиссии по климатологии разработали ряд новых руководящих документов, таких как Руководство по проверке сезонных климатических прогнозов [2], Руководящие принципы по эффективной практике климатического обслуживания для заинтересованных пользователей [3], Руководящие принципы по анализу экстремальных явлений для эффективного управления климатическими рисками [10]. Анализ новых институциональных, инфраструктурных, научных и организационных достижений и возможности их использования для повышения эффективности работы РКОФ стал центральной темой третьего совещания по глобальному обзору функционирования РКОФ (Global RCOF Review). Совещание состоялось 5–7 сентября 2017 года в г. Гуаякиль, Эквадор, на базе Международного

научно-исследовательского центра по исследованиям Эль-Ниньо. В ходе работы совещания рассматривались различные аспекты подготовки, интерпретации и распространения региональных климатических прогнозов через механизмы РКОФ.

### **Северо-Евразийские климатические форумы как часть глобальной структуры РКОФ**

Выполняя рекомендации ВМО и Целевой группы высокого назначения Глобальной рамочной основы для климатического обслуживания, Северо-Евразийский климатический центр (СЕАКЦ) проводит сессии регионального климатического форума для региона бывшего СССР на регулярной основе с мая 2011 года. В номенклатуре ВМО этот форум получил сокращенное название NEACOF (в русской транскрипции – СЕАКОФ). Основной задачей форума СЕАКОФ является объединение на территории СНГ усилий ученых, специалистов в области долгосрочного прогнозирования и исследований короткопериодных колебаний климата для выхода на качественно новый уровень знаний о текущем состоянии климатической системы и выработки прогноза поведения климатической системы на предстоящий сезон. Сессии СЕАКОФ проводятся на базе СЕАКЦ [7] два раза в год, осенью и весной, в Москве на базе Гидрометцентра России. Практикуется организация сессий как в очной, так и в виртуальной формах посредством интернет-связи. Привлечение к участию на форуме поставщиков и пользователей прогностической и климатической информации дает возможность обменяться мнениями и опытом по разработке специализированных прогнозов, ориентированных на пользователя, и совместными усилиями определить стратегию наиболее эффективного применения климатической информации для задач социально-экономического сектора.

В период с 14 по 16 ноября 2017 года состоится очередная 13-я сессия климатического форума СЕАКОФ. Для обеспечения максимальной эффективности мероприятия оргкомитет СЕАКОФ предлагает разные формы взаимодействия участников. Привлечение к работе форума ведущих российских и международных экспертов из прогностических центров дальнего зарубежья, а также представителей секретариата ВМО способствует выходу СЕАКОФ на новый качественный уровень.

Как и другие РКОФ, каждая сессия СЕАКОФ включает в себя учебную компоненту в форме учебно-практических семинаров, направленных на повышение квалификации и укрепление кадрового потенциала климатологов НМГС. По инициативе СЕАКЦ на сайте Регионального учебного центра ВМО, функции которого выполняет Институт повышения квалификации Росгидромета (ИПК), поддерживается электронный ресурс, на котором размещаются учебные материалы по долгосрочным прогнозам погоды. В преддверии 13-й сессии СЕАКОФ планируется проведение учебного курса (в дистанционной и очной формах) по основам сезонного ансамблевого прогнозирования.

Участники сессии СЕАКОФ имеют возможность предварительно ознакомиться с лекциями в форме презентаций и с другими учебными материалами, размещенными на странице сайта ИПК Росгидромета, что позволит слушателям заранее изучить содержание учебного курса и сформулировать перечень интересующих вопросов. В программе очной сессии курса предусмотрены лекции по вопросам технологии выпуска ансамблевых сезонных прогнозов [4]. Будут рассматриваться ансамблевые подходы к разработке долгосрочных статистических и синоптических прогнозов; макроциркуляционные факторы, формирующие прогностические сигналы в Северной Евразии; синоптико-статистическая интерпретация ансамблевых сезонных прогнозов [6]; верификация долгосрочных ансамблевых прогнозов. Планируется также проведение практических занятий, посвященных анализу крупномасштабных индексов циркуляции, практике составления метеорологического прогноза с использованием автоматизированной системы «Долгосрочник-синоптик» [8] и составления прогноза на месяц синоптико-статистическим методом.

Однако основной задачей сессий СЕАКОФ является разработка консенсусного прогноза температуры воздуха и осадков на предстоящий сезон. Процесс подготовки этого прогноза включает в себя следующие этапы. Прежде всего, специалисты обсуждают состояние текущих крупномасштабных (глобальных и региональных) климатических аномалий. Учитывается информация о состоянии приземного климата (температура приземного воздуха и атмосферные осадки) за сезон и наиболее значительные климатические аномалии этого периода на территории ответственности Северо-Евразийского климатического центра. Такого рода оценки рассчитываются совместно специалистами Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН и сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных на основе анализа данных гидрометеорологических наблюдений на станциях государственных наблюдательных сетей стран СНГ и в соответствии с новыми рекомендациями 24-й сессии МСГ СНГ. В качестве базового периода для климатических норм при расчете аномалий температуры и осадков используется период с 1961 по 1990 год. Современные изменения климата на территории СНГ, характеризующиеся оценками линейного тренда за последние десятилетия, дают представление о вероятном вкладе долгопериодной изменчивости в общую дисперсию ожидаемых аномалий.

Следующий этап подготовки прогноза связан с анализом крупномасштабных структур атмосферной циркуляции. Оценка состояния глобальных циркуляционных аномалий является важной частью общего физико-синоптического анализа ожидаемых условий на предстоящий период. Рассматриваются связи аномалий с крупномасштабными явлениями, влияющими на состояние атмосферы, такими как Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК) (хотя влияние ЭНЮК на формирование климатических аномалий на территории Северной Евразии является ограниченным),

муссонами, планетарными волнами и др. В оценках предсказуемости на сезонных интервалах времени важная роль отводится учету инерционных факторов окружающей среды (температура поверхности океана, лед, снежный покров и влажность почвы), которые в силу своей относительной консервативности легче прогнозируются. По этой причине в ходе подготовки консенсусного прогноза участники сессии СЕАКОФ уделяют особое внимание рассмотрению ожидаемого распределения температуры поверхности океана в Северном полушарии, состоянию ледового покрова в Арктике и снежного покрова в Северной Евразии. Для обеспечения возможности прогноза низкочастотной изменчивости атмосферы и эволюции крупномасштабных структур атмосферной циркуляции на более длительных временных масштабах в практике СЕАКОФ используются индексы дальних связей Уоллеса – Гацлера, Тихоокеанско-Североамериканского (PNA, Pacific-North American), Восточноатлантического (EA, East Atlantic), Западноатлантического (WA, West Atlantic), Западнотихоокеанского (WP, West Pacific), Евразийского (EU, Eurasian) колебаний, а также индекс Северо-Атлантического колебания (NAO), влияние которого на погоду и климат в Северной Евразии является значимым [5].

После обзора климатических условий и их вероятного влияния на формирование последующих аномалий проводится анализ и интерпретация прогностической продукции, которую необходимо принять во внимание при формулировке окончательного прогноза.

Источниками такой продукции являются:

- Северо-Евразийский климатический центр;
- Климатический центр стран Азиатско-Тихоокеанского экономического союза (APEC Climate Center – APCC, Корея);
- Мультимодельная система сезонного прогноза погоды EUROSIP, которая объединяет в единую прогностическую систему сезонные прогнозы ECMWF, Met Office and Météo-France;
- Международный научно-исследовательский институт по проблемам климата и общества (IRI, США);
- Ведущий центр ВМО по мульти-модельным долгосрочным прогнозам (LC MMELRF);
- Токийский климатический центр (TCC, Япония);
- Национальные гидрометеорологические службы государств СНГ (НГМС СНГ).

Помимо гидродинамических ансамблевых прогнозов, анализируются прогнозы, подготовленные на базе эмпирических методов. По аналогии с вероятностной интерпретацией ансамблевых гидродинамических прогнозов используется методика [9] применения вероятностного подхода к синоптическим прогнозам. Как показали результаты исследований [1] по объединению синоптических и гидродинамических прогнозов для температуры воздуха по Европейскому региону, комплексирование разнородных методов в большинстве случаев позволяет объединить их сильные стороны и повысить качество результирующего прогноза.

Таким образом, окончательный консенсусный прогноз составляется на основе экспертной оценки большого объема диагностической и прогностической продукции из разных источников.

В программе СЕАКОФ предусматривается возможность обмена опытом по климатическому обслуживанию экономических секторов региона и определяются виды ориентированной на пользователя климатической продукции, представляющие наибольший интерес для самостоятельной разработки силами НГМС. Использование научно-обоснованной фактической и прогностической климатической информации при осуществлении планирования, политики и практических мер в разных отраслях экономики сталкивается с рядом трудностей. На современном этапе приоритетными отраслями для климатического обслуживания ВМО определены повышение эффективности сельского хозяйства и обеспечение продовольственной безопасности, уменьшение рисков стихийных бедствий, развитие энергетики, охрана здоровья населения и рациональное управление водными ресурсами.

В порядке расширения традиционного для РКОФ формата, программой СЕАКОФ-13 предусматривается проведение трех круглых столов, посвященных обсуждению взаимодействия между Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Министерством здравоохранения и Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по вопросам климатического обслуживания в интересах здоровья населения, эффективного управления водными ресурсами, планирования развития сельского и лесного хозяйства. Хочется надеяться, что такая форма взаимодействия с секторальными пользователями будет способствовать созданию новых прикладных прогностических моделей и индексов, а также разработкам новых критериев для оценки опасности прогнозируемых климатических рисков.

При дальнейшем развитии СЕАКОФ очень важно опираться на прошлый опыт, а также обеспечить обратную связь с участниками форумов. Одним из принципов СЕАКОФ является открытость для предложений по улучшению его организации и работы, которые всегда приветствуются и по возможности учитываются.

Деятельность СЕАКОФ и СЕАКЦ получила частичную финансовую и логистическую поддержку Российского научного фонда (грант № 14-37-0053П) в Гидрометцентре России.

Методика анализа консенсусных прогнозов разработана при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №17-05-01227).

*Поступила в редакцию 15.09.2017 г.*

## Список использованных источников

1. Вильфанд Р.М., Мартазинова В.Ф., Цепелев В.Ю., Хан В.М., Мироничева Н.П., Елисеев Г.В., Иванова Е.К., Тищенко В.А., Уткузова Д.Н. Опыт комплексирования синоптико-статистических и гидродинамических прогностических систем // *Метеорология и Гидрология*. 2017. № 8. С. 5-17
2. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Том I. (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). Глобальные аспекты. Издание 1992 г. ВМО-№ 485. Добавление II.8. Стандартная система проверки оправданности (ССПО) долгосрочных прогнозов (ДП). Женева, Швейцария: Секретариат Всемирной Метеорологической Организации, 2005. 173 с.
3. Руководство по климатологической практике // ВМО-№100. 3-е изд. Женева, Швейцария: Всемирная Метеорологическая Организация, 2014. 156 с.
4. Киктев Д.Б., Хан В.М., Крыжов В.Н., Зарилов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А. Технология выпуска региональных долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕ-АКЦ) // *Труды Гидрометцентра России*. 2015, Вып. 358. С. 36-58.
5. Куликова И.А., Круглова Е.Н., Киктев Д.Б. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть 2. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 4. С. 5-16.
6. Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Гельфан А.Н. Применение статистической коррекции для детерминистских месячных и сезонных прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России // *Труды Гидрометцентра России*. 2015. Вып. 358. С. 121-132.
7. Хан В.М. Деятельность Северо-Евразийского климатического центра (СЕ-АКЦ) и Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной структуре ВМО по улучшению климатического обслуживания // *Труды Гидрометцентра России*. 2015. Вып. 358. С. 5-12.
8. Цепелев В.Ю. Специализированная информационно-вычислительная система анализа пространственно-временных рядов гидрометеорологических характеристик и ее использование в задачах разработки прогнозов погоды на месяц / *Труды научного семинара Национальной академии наук Украины и Российского фонда фундаментальных исследований «Проблемы и достижения долгосрочного метеорологического прогнозирования»*, Киев, Украина, 5-7 октября 2011 г. Киев: Ника, 2012. С. 84-99.
9. Цепелев В.Ю., Хан В.М. Вероятностное представление долгосрочных метеорологических прогнозов, разработанных синоптическими методами // *Метеорология и Гидрология*. 2015. № 4. С. 17-31.
10. Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation // WMO-TD No. 1500. 2009.

## SUMMARIES

**The concept of WMO Regional Climate Outlook Forum and the contribution of North Eurasia Climate Outlook Forum to its implementation / Khan V.M. // *Proceedings of Hydrometcentre of Russia*. 2017. Vol. 366. P. 5-13.**

The article provides an overview of current international initiatives under the auspices of WMO aimed at implementation of the concept of the Regional Climate Outlook Forum. Special attention has been given to the role of the North-Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF) in the international infrastructure for climate services through RCOF mechanisms. The NEACOF assigned tasks and their implementation within the framework of international obligations have been discussed.

**Keywords:** Regional Climate Outlook Forum, North-Eurasian Climate Outlook Forum, climate services, consensus forecasts.

УДК 551.509

## **ВЫПУСК ДЕТАЛИЗИРОВАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ В РАМКАХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕВЕРО-ЕВРАЗИЙСКОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА (СЕАКЦ)**

***Д.Б. Киктев, М.А. Толстых, Р.Б. Зарипов, Е.Н. Круглова,  
И.А. Куликова, В.А. Тищенко, В.М. Хан***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва  
khan@tcom.ru*

В статье дается описание технологии еженедельных выпусков глобальных вероятностных и детерминистических еженедельных и месячных прогнозов на базе модели ПЛИАВ. Предусмотрены возможности реализации мультимодельного подхода, основанного на использовании моделей общей циркуляции атмосферы ПЛИАВ и ФГБУ «ГГО». В рамках основной технологической линии создана схема детализации прогнозов температуры воздуха и осадков для 70 станций СНГ. Приводятся результаты мониторинга качества прогнозов в реальном режиме времени. В качестве дополнительной информации используются прогнозы индексов, характеризующих основные моды крупномасштабной изменчивости атмосферной циркуляции на Северном полушарии.

*Ключевые слова:* гидродинамические прогнозы, мультимодельные ансамбли, синоптико-статистическая интерпретация, индексы циркуляции, верификация прогнозов.

### **Введение**

Согласно классификации Всемирной метеорологической организации (ВМО), долгосрочными называются метеорологические прогнозы на срок от 30 суток до двух лет. Прогнозы на срок свыше двух лет уже относятся к прогнозам климата. Вместо термина «долгосрочный прогноз погоды» в настоящее время используется термин «долгосрочный метеорологический прогноз» (ДМП), так как объектами прогнозирования на долгие сроки являются не мгновенные значения метеорологических элементов, ассоциируемые со словом «погода», и не индивидуальные структуры в атмосферных течениях, а статистические характеристики состояния атмосферы в период прогноза. Физической основой долгосрочных прогнозов служат гипотезы о решающей роли внешних воздействий в долгопериодной динамике атмосферы. Предполагается, что для больших промежутков времени (сезон и более) состояние атмосферы уже не будет зависеть от начальных условий, а будет определяться притоками энергии извне.

Степень детализации сезонных прогнозов, обычно представляемых в терминах вероятностей трех категорий средних за период прогноза аномалий (выше/ниже/около нормы), не устраивает многих потребителей. В условиях возрастающих потребностей со стороны водного хозяйства, энергетики, сельского хозяйства и других отраслей экономики возникает необходимость в развитии систем прогнозирования на внутрисезонных интервалах времени. Прогнозы метеорологических параметров на интервалах времени от 10 суток до 1–3 месяцев занимают промежуточное положение между среднесрочными прогнозами (на период до 10 суток) и прогнозами на сезон.

Трудности такого рода прогнозирования определяются необходимостью учета, с одной стороны, влияния медленно меняющихся внешних воздействий. С другой стороны, на внутрисезонных временных масштабах еще сохраняются элементы памяти о начальном состоянии системы «атмосфера – деятельный слой подстилающей поверхности». Возможности ДМП при этом зависят от относительной роли изменчивости, определяемой внешними вынуждающими воздействиями на атмосферу, в сравнении с ее собственной, «внутренней» изменчивостью, обусловленной динамической неустойчивостью атмосферных течений.

В настоящее время оперативные прогнозы на внутрисезонных интервалах времени выпускаются Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды, метеорологическими центрами Великобритании, США, Франции, Канады, Японии 1–2 раза в неделю. В 2013 году под эгидой Всемирной программы метеорологических исследований и Всемирной программы исследования климата ВМО стартовал пятилетний проект по внутрисезонному прогнозированию S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction Project), нацеленный на улучшение понимания процессов в системе «атмосфера – океан – суша – лед» на временных масштабах до сезона, повышение успешности прогнозов в этом временном диапазоне и ускорение их практического внедрения [25].

В России практическая деятельность в области ДМП ведется в Гидрометцентре России и в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ФГБУ «ГГО») [8, 9, 14, 16]. В рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) реализована технология оперативного выпуска долгосрочных прогнозов с недельной и месячной детализацией. Проведены совместные испытания прогнозов на основе технологий Гидрометцентра России и ГГО. В соответствии с Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гидрогеофизическим прогнозам от 20 июня 2017 г. рекомендовано использовать прогнозы Гидрометцентра России и ГГО, а также мультимодельные прогнозы в информационном обеспечении СЕАКЦ со статусом «консультативные прогнозы» с публикацией полученных оценок успешности прогнозов на сайте.

## 1. Технологическая линия

В Гидрометцентре России по аналогии со схемой сезонного прогноза реализована технология выпуска долгосрочных прогнозов с недельной детализацией (рис. 1). Сходство технологий определяется единой вычислительной основой, которой является модель ПЛАВ, разработанная в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России [14, 16] со суточной дискретностью записи прогностической информации.

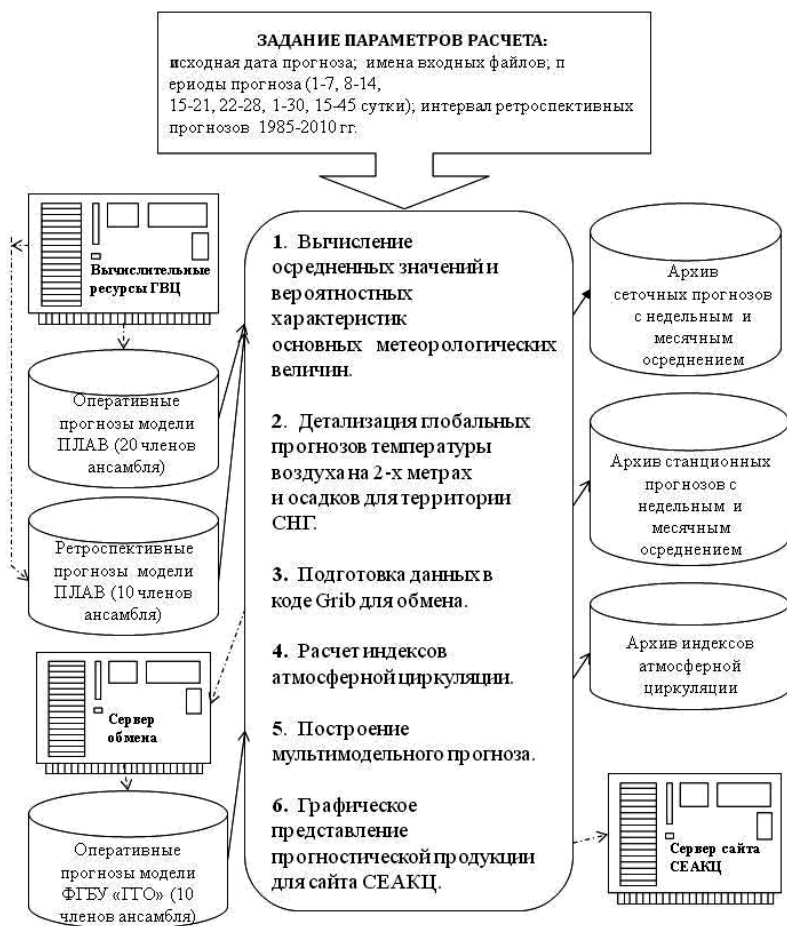


**Рис. 1.** Блок-схема технологической линии долгосрочных прогнозов с недельной и месячной дискретизацией, реализованной на сервере СЕАКЦ.

Долгосрочные прогнозы с недельной и месячной дискретизацией составляются один раз в неделю (в середине каждой недели) с осреднением 1–7 (1-я неделя), 8–14 (2-я неделя), 15–21 (3-я неделя), 22–28 (4-я неделя), 1–30 (1-й месяц) и 16–45 (2-й месяц) суток. При выборе данных в суточной

дискретности разработаны программы, позволяющие формировать по исходным данным интервалы осреднений переменной длины. Такая гибкость позволяет в случае необходимости изменить временные окна для прогноза и для оценки качества прогностической схемы (мониторинг).

Результаты интегрирования модели передаются по локальным и глобальным линиям связи. На специально выделенном сервере СЕАКЦ в операционной среде UNIX создан блок постобработки ансамблей численных долгосрочных прогнозов. Итоговой продукцией постобработки являются детерминистические и вероятностные прогнозы метеорологических полей, которые по локальной сети Гидрометцентра России передаются на сервер СЕАКЦ. Для обмена (с использованием внешнего сервера обмена) прогностическими данными между Гидрометцентром России и ГГО им. Воейкова созданы процедуры выделения и архивирования полей аномалий основных метеорологических величин и вероятностей по трем равновероятным грациям (ниже нормы, норма и выше нормы) за недели и месяцы (на срок до 1,5 месяца). Проведен предварительный анализ и согласование исходных фактических и климатических полей, используемых в Гидрометцентре России и ГГО. Полученные по глобальной сети прогностические данные модели ГГО используются для создания долгосрочного мультимодельного прогноза. Объединяются результаты расчетов средних ансамблевых аномалий (с исключенными систематическими ошибками) и вероятностей трех граций, что позволяет получить добавочную стоимость за счет простого объединения ансамблей (в оперативном режиме формируются двадцать прогнозов по модели ПЛАВ и десять по модели ГГО).

В рамках основной технологической линии глобальных долгосрочных прогнозов метеорологических величин создана схема пространственной детализации прогнозов температуры воздуха и осадков для 70 станций СНГ. Блок статистической интерпретации, реализованный в вычислительной среде сервера СЕАКЦ, включает процедуры, позволяющие получить по результатам расчетов глобальных полей приземной температуры воздуха и осадков на основе модели ПЛАВ Гидрометцентра России и модели ГГО, значения температуры воздуха и осадков на станциях. В качестве основного метода обработки исходной информации используется метод билинейной интерполяции. Результатами являются прогностические значения температуры воздуха и осадков для 70 станций, расположенных на территории СНГ, полученные отдельно для каждой из четырех недель и двух месяцев (с нулевой и двухнедельной заблаговременностью).

## **2. Основные виды продукции**

Информация о деятельности СЕАКЦ, результаты оперативной работы, научные и учебные материалы размещаются на сайте Северо-Евроазиатского климатического центра (<http://neacc.meteoinfo.ru/>). В список основной прогностической продукции входят глобальные поля

(на сетке с пространственным разрешением  $2,5 \times 2,5$  градуса широты и долготы) аномалий:

- геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа;
- температуры воздуха на уровне поверхности 850 гПа;
- атмосферного давления на уровне моря;
- приземной температуры воздуха;
- суммарных осадков.

На прогностической странице сайта представлены карты пространственного распределения средних по ансамблю аномалий (детерминированные прогнозы), а также вероятностей указанных выше метеорологических величин для трех основных градаций (ниже нормы, норма и выше нормы) с недельным и месячным разрешением. В целях кластеризации используются терцили, полученные на материалах ретроспективного интегрирования (1985–2010 гг.). Результаты прогнозов регулярно (раз в неделю) обновляются на сайте СЕАКЦ. На рис. 2 приводится пример прогностической продукции для региона Северной Евразии.

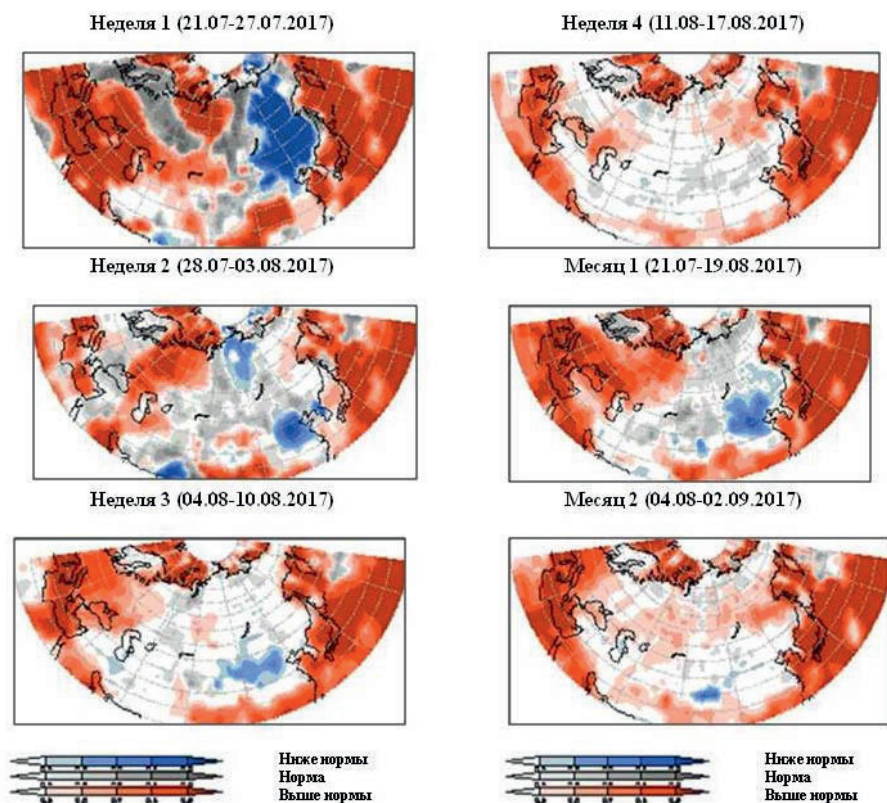


**Рис. 2.** Карты пространственного распределения мультимодельных недельных и месячных вероятностных прогнозов аномалий температуры воздуха по исходным данным за 27.07.2017 г.

На сайте также размещается информация об аномальных метеорологических ситуациях, полученная на основе синоптической интерпретации недельных и месячных прогнозов основных метеорологических величин, а также фактических данных.

### 3. Мониторинг качества прогнозов

Мониторинг качества прогнозов с недельной дискретизацией в реальном времени осуществляется в формате единой технологической линии еженедельных выпусков глобальных долгосрочных метеорологических прогнозов, развернутой и отлаженной на сервере СЕАКЦ.

На рис. 3 представлен блок технологической линии, предназначенный для оценки и анализа результатов численного интегрирования гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) ПЛАВ Гидрометцентра России (НМС) и ГГО (МГО), а также детализированных с помощью процедуры билинейной интерполяции прогнозов температуры воздуха и осадков для 70 станций СНГ. В список верифицируемой прогностической продукции входят глобальные поля (на сетке с пространственным разрешением  $2,5 \times 2,5$  градуса широты и долготы) геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа, температуры воздуха на уровне поверхности 850 гПа, атмосферного давления на уровне моря, приземной температуры воздуха и суммарных осадков.

Мониторинг качества прогнозов проводится в оперативном режиме один раз в начале каждого месяца по мере поступления данных реанализа и наблюдений. В качестве эталонного архива с учетом соотношения оперативности и качества информации для оценки оправдываемости прогнозов используется реанализ NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 [21].

Расчет климатических характеристик производится по данным этого архива на основе базового периода с 1985 по 2010 г. Как для отдельных моделей, так и для мультимодельного ансамбля прогнозов строятся глобальные карты пространственного распределения показателей качества, а также рассчитываются осредненные оценки для различных регионов Земного шара (глобуса, Северного полушария, северных и южных тропиков, Северной Азии, Европы, СНГ и Арктики). Предусмотрена возможность дополнительного расчета показателей отдельно по точкам суши и по точкам моря во всех выделенных регионах, что может быть полезно для анализа физических блоков моделей.

Для станционных данных проводится оценка качества прогнозов приземной температуры воздуха и осадков. Основным эталонным массивом служит архив средних суточных значений температуры воздуха и осадков, полученный на базе архивов ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/data>) для 70 станций, расположенных на территории СНГ. Архив регулярно пополняется станционными данными базы МАКТ Гидрометцентра России. В рамках технологической линии разработаны и реализованы также программные средства пополнения баз фактических и прогностических данных, необходимых для оперативного или квазиоперативного функционирования схемы долгосрочного прогноза метеорологических условий с недельной дискретизацией.

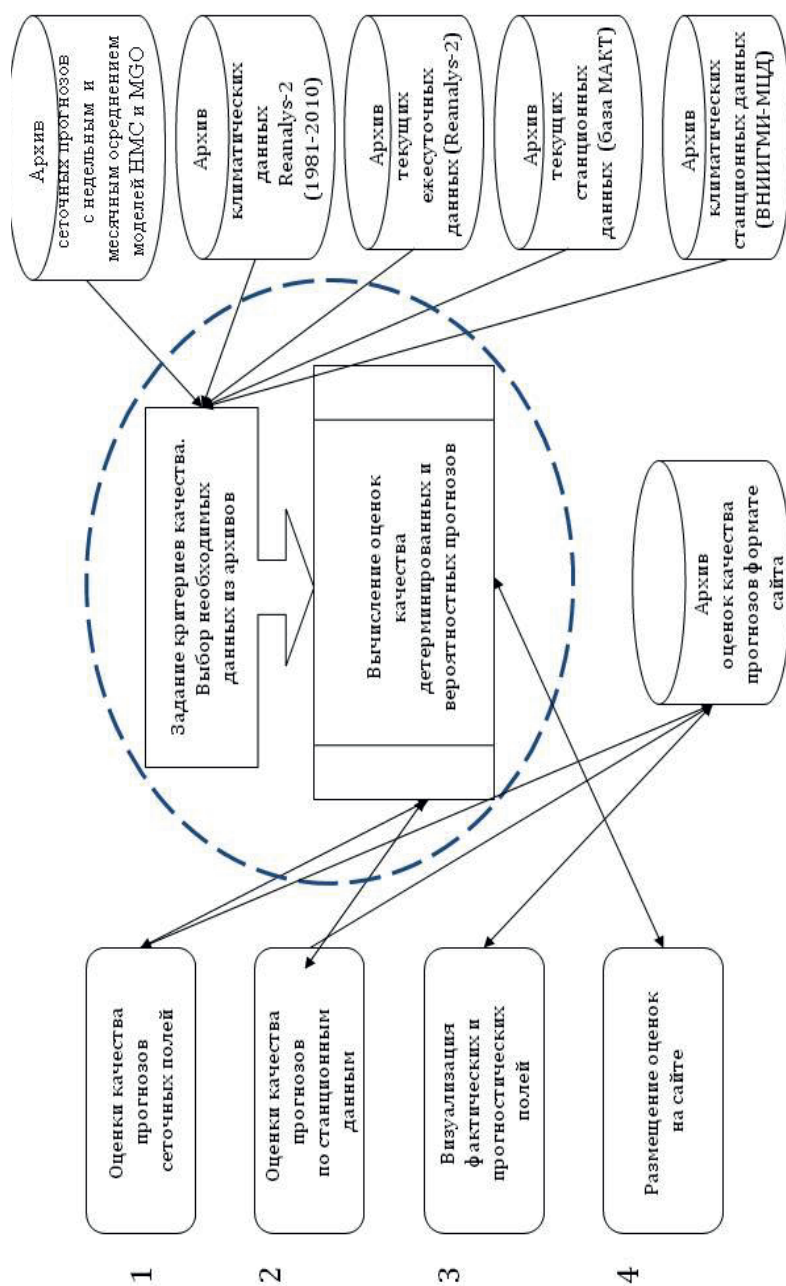


Рис. 3. Блок мониторинга качества прогнозов, реализованный на сервере SEACQ.

Одним из важнейших этапов мониторинга является визуализация прогностических данных, которая осуществляется в автоматическом режиме в графической среде GrADS. Визуальное сравнение путем сопоставления по месту (пространству) и по времени прогностических и фактических величин позволяет получить наиболее полную информацию о качестве прогнозов. Количественные оценки качества прогнозов, составленных с использованием гидродинамических моделей Гидрометцентра России и ГГО строятся с учетом рекомендаций ВМО [см., например, 7, 10] а также накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов в Гидрометцентре России.

В качестве основных оценок детерминистических прогнозов используются следующие показатели: коэффициент корреляции знаков  $\rho$ , относительная ошибка прогноза  $Q$ , средний квадрат ошибки (mean squared error) прогноза MSE, критерий качества по среднему квадрату ошибки MSSS, коэффициент корреляции аномалий (anomaly correlation coefficient) AC. Для оценки качества вероятностных прогнозов используется показатель ROC, подробно описанный в работе Муравьева и Вильфанда [11].

Ниже дается краткая характеристика качества прогнозов, полученных в ходе оперативных испытаний созданной технологии за период с 30 марта 2016 г. по 15 марта 2017 г. (51 случай). В табл. 1 приводятся средние значения для данного периода параметра MSSS, позволяющего определить преимущества методических прогнозов по сравнению с климатическими. Расчет статистической достоверности полученных оценок производится с помощью непараметрического метода повторных выборок с возвратом, известного как «бутстрэп» [18]. Повторные выборки (или «реплики») генерируются с помощью датчика случайных чисел в количестве, равном 100. При этом для проверки нулевой гипотезы при двустороннем тесте определяется доверительный интервал между квантилями 5 и 95 % ранжированного ряда разностей. Если ноль лежит за пределами доверительного интервала, нулевая гипотеза (между климатическими и методическими прогнозами нет отличий) отклоняется при 10%-ном уровне значимости.

Как известно, для средних значений и для многих других статистических характеристик ширина интервала, соответствующего распределению бутстрэпа, и ширина интервала, соответствующего реальному распределению, как правило, совпадают [2].

Как видно из табл. 1, для первого временного интервала (1-я неделя) качество прогнозов выше климатического. Для полей давления и температуры воздуха наименьшие отличия от климатических на данном временном интервале характерны для тропических широт. На втором временном интервале (2-я неделя) качество прогнозов резко падает. Тем не менее полезный сигнал в полях H500 и температуры воздуха присутствует. На временных интервалах 3 и 4-я неделя наилучшие оценки прогнозов отмечаются в тропических широтах, где в связи с наличием медленно меняющихся условий (термическое состояние океана, Осцилляция Мадде-

на – Джулиана – важнейшая мода внутрисезонной (30–90 суток) изменчивости тропической атмосферы), предсказуемость на длительных интервалах интегрирования повышается. В умеренных широтах на третьем и четвертом интервалах интегрирования (за пределами интервала практической предсказуемости, равного примерно двум неделям), в отличие от тропических широт, методические прогнозы не содержат полезного сигнала и практически не отличаются от климатических прогнозов.

Существование предсказуемости второго рода определяет возможности прогноза крупномасштабных структур атмосферной циркуляции, а также статистических характеристик метеорологических полей на месячных и более длительных интервалах времени. На пятом временном интервале (1-й месяц) качество методических прогнозов с учетом доверительных интервалов снова оказывается выше климатических. Исключением являются прогнозы осадков, качество которых за пределами первого временного интервала (1-я неделя) оказывается неудовлетворительным. На шестом временном интервале наиболее предсказуемыми оказываются атмосферные процессы, протекающие в тропиках. Таким образом, результаты верификации свидетельствуют о том, что методические прогнозы во многих случаях оказываются лучше климатических и могут использоваться как вспомогательные в оперативной практике.

Блок верификации и мониторинга качества прогнозов является важнейшей составляющей технологической линии. Развитие и создание новых версий гидродинамических моделей требуют знания характеристик качества, способных выявить не только систематические ошибки, оценить систематическое поведение прогностических систем, но и проводить исследования предсказуемости геофизических процессов. Оценки качества прогнозов необходимо учитывать в процессе оперативной практики и ориентироваться на географические регионы с наиболее высокой их надежностью.

#### **4. Моделирование низкочастотной изменчивости**

Эффективность прогностической системы на длительных интервалах времени определяется ее способностью воспроизводить крупномасштабные структуры, связанные с низкочастотной изменчивостью атмосферы. Условно принято, что диапазон низких частот в общей циркуляции атмосферы охватывает колебания за пределами синоптической изменчивости, обусловленной формированием и разрушением вихрей. Как известно, волны синоптического масштаба (ложбины и гребни, циклоны и антициклоны) являются проявлением бароклинной неустойчивости – обычного свойства атмосферной циркуляции средних широт, связанного с вращением Земли и наличием горизонтальных контрастов температуры (вертикальным сдвигом ветра). Поскольку время жизни бароклинного вихря составляет примерно 7–10 суток, под низкочастотной изменчивостью понимаются атмосферные флуктуации с временными масштабами порядка 7 дней и больше [3, 17].

**Таблица 1.** Средние оценки качества (по MSSS) прогнозов H500, MSLP, T850, TRSF и PREC за период с 30 марта 2016 г. по 15 марта 2017 г. (51 случай) для трех регионов: СНГ, СП (Северное полушарие) и ТР (тропики). Красным цветом обозначены статистически значимые (10%-ный уровень) различия по отношению к климату

|                  | H500  |       |      | MSLP  |       |       | T850  |       |       | TRSF  |       |      | PREC  |       |       |
|------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|                  | СНГ   | СП    | ТР   | СНГ   | СП    | ТР    | СНГ   | СП    | ТР    | СНГ   | СП    | ТР   | СНГ   | СП    | ТР    |
| 1 неделя ГМЦ     | 0,74  | 0,72  | 0,75 | 0,66  | 0,63  | 0,42  | 0,67  | 0,63  | 0,33  | 0,52  | 0,35  | 0,34 | -0,11 | -0,02 | 0,01  |
| 1 неделя ГГО     | 0,79  | 0,78  | 0,78 | 0,72  | 0,7   | 0,45  | 0,73  | 0,69  | 0,29  | 0,64  | 0,64  | 0,36 | 0,19  | 0,17  | -0,07 |
| 1 неделя ГМЦ+ГГО | 0,82  | 0,8   | 0,83 | 0,76  | 0,74  | 0,6   | 0,76  | 0,73  | 0,4   | 0,66  | 0,59  | 0,43 | 0,18  | 0,19  | 0,07  |
| 2 неделя ГМЦ     | -0,06 | -0,1  | 0,51 | -0,25 | -0,23 | -0,23 | -0,05 | -0,07 | 0,04  | 0     | -0,1  | 0,04 | -0,32 | -0,27 | -0,05 |
| 2 неделя ГГО     | 0,22  | 0,2   | 0,59 | 0,02  | 0,02  | 0,01  | 0,25  | 0,18  | 0,06  | 0,23  | 0,26  | 0,16 | -0,02 | -0,04 | -0,1  |
| 2 неделя ГМЦ+ГГО | 0,2   | 0,19  | 0,63 | 0,02  | 0,06  | 0,1   | 0,25  | 0,2   | 0,15  | 0,25  | 0,22  | 0,2  | -0,04 | -0,04 | 0,01  |
| 3 неделя ГМЦ     | -0,28 | -0,25 | 0,41 | -0,36 | -0,34 | -0,33 | -0,22 | -0,18 | -0,02 | -0,12 | -0,12 | 0,04 | -0,18 | -0,18 | -0,05 |
| 3 неделя ГГО     | -0,01 | 0,03  | 0,51 | -0,14 | -0,11 | -0,12 | 0     | 0,03  | 0,03  | 0,04  | 0,14  | 0,11 | -0,08 | -0,08 | -0,1  |
| 3 неделя ГМЦ+ГГО | -0,05 | -0,01 | 0,52 | -0,15 | -0,11 | -0,05 | -0,01 | 0,03  | 0,09  | 0,05  | 0,12  | 0,17 | -0,06 | -0,06 | -0,01 |
| 4 неделя ГМЦ     | -0,14 | -0,08 | 0,39 | -0,11 | -0,14 | -0,24 | -0,17 | -0,08 | 0,02  | -0,12 | -0,09 | 0,05 | -0,12 | -0,08 | -0,03 |
| 4 неделя ГГО     | -0,12 | -0,06 | 0,5  | -0,13 | -0,16 | -0,13 | -0,09 | -0,04 | 0,04  | -0,01 | 0,1   | 0,13 | -0,07 | -0,09 | -0,1  |
| 4 неделя ГМЦ+ГГО | -0,07 | -0,02 | 0,51 | -0,06 | -0,08 | -0,05 | -0,06 | 0     | 0,1   | 0     | 0,09  | 0,16 | -0,05 | -0,04 | -0,01 |
| 1 месяц ГМЦ      | 0,09  | 0,11  | 0,72 | -0,05 | -0,09 | -0,14 | 0,15  | 0,15  | 0,22  | 0,09  | -0,02 | 0,24 | -0,11 | -0,12 | -0,01 |
| 1 месяц ГГО      | 0,24  | 0,27  | 0,77 | 0,06  | 0,01  | 0     | 0,32  | 0,31  | 0,2   | 0,33  | 0,43  | 0,33 | 0,02  | -0,01 | -0,08 |
| 1 месяц ГМЦ+ГГО  | 0,24  | 0,28  | 0,78 | 0,09  | 0,08  | 0,12  | 0,31  | 0,32  | 0,28  | 0,31  | 0,33  | 0,36 | 0,03  | 0,03  | 0,05  |
| 2 месяц ГМЦ      | -0,13 | -0,03 | 0,62 | -0,13 | -0,21 | -0,26 | -0,12 | 0,02  | 0,12  | -0,09 | -0,07 | 0,14 | -0,11 | -0,1  | -0,03 |
| 2 месяц ГГО      | -0,08 | 0,02  | 0,69 | -0,14 | -0,19 | -0,23 | -0,01 | 0,07  | 0,11  | 0,09  | 0,26  | 0,23 | -0,07 | -0,11 | -0,15 |
| 2 месяц ГМЦ+ГГО  | -0,04 | 0,07  | 0,72 | -0,06 | -0,11 | -0,04 | 0     | 0,11  | 0,19  | 0,08  | 0,2   | 0,26 | -0,04 | -0,04 | 0     |

Заметим, что синоптические методы долгосрочных прогнозов Гидрометцентра России на протяжении многих лет базировались на понятиях естественного синоптического периода, естественного синоптического района и естественного синоптического сезона [1], тесно связанных с пространственными и временными масштабами крупномасштабных структур атмосферной циркуляции. В [4, 6] показана целесообразность использования в качестве характеристик низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции индексов дальних связей. Блок расчета индексов по аналогии со схемой сезонного прогноза является составной частью технологической линии детализированных прогнозов СЕАКЦ. В оперативном режиме наряду с прогнозами глобальных метеорологических полей на базе модели ПЛАВ составляются недельные и месячные прогнозы 8 индексов: **EA** (Восточно-атлантическое колебание), **WA** (Западно-атлантическое колебание), **EU** – (Евразийское колебание), **WP** (Западно-тихоокеанское колебание), **PNA** (Тихоокеанское-северо-американское колебание), **NAO** (Северо-атлантическое колебание), **POL** (Полярное колебание), **AOS** (Арктическая осцилляция).

На рис. 4 приводятся примеры прогностических ансамблей вышеназванных индексов атмосферной циркуляции. Для оценки влияния крупномасштабных атмосферных процессов, характеризующихся данными индексами, на региональный режим температуры воздуха и осадков можно воспользоваться размещенными на сайте СЕАКЦ (<http://seakc.meteoinfo.ru/forecast/259>) сборными композитными картами, на которых представлены очаги положительных и отрицательных аномалий температуры воздуха и осадков для различных фаз индексов циркуляции в зимний, весенний, летний и осенний периоды. Полученные результаты являются статистически значимыми и позволяют сформулировать некоторые климатологические приемы уточнения долгосрочных прогнозов с учетом результатов композитного анализа.

Так, например, если на прогностической карте поверхности 500 гПа прослеживаются структуры, связанные с положительными или отрицательными фазами того или иного индекса, следует с большей вероятностью ожидать в данном географическом районе представленные на композитных картах градации (выше или ниже нормы) температуры и осадков.

Другой аспект, связанный с использованием прогнозов индексов, заключается в априорной оценке качества прогнозов. В процессе многолетней синоптической практики установлена связь между режимами атмосферной циркуляции и качеством прогнозов. Согласно Пальмеру [24], наиболее высокие оценки качества соответствуют положительным значениям индекса PNA и наоборот. При этом предполагается, что рост ошибки прогноза связан с ростом баротропной неустойчивости атмосферы, которая, в свою очередь весьма тесно зависит от знака PNA. Обсуждаются также связи PNA с Эль-Ниньо. О'Лэник и Ливзи [23] исследовали связи между ошибками среднесрочных прогнозов и различными режимами атмосферной циркуляции при помощи метода главных компонент с вращением.

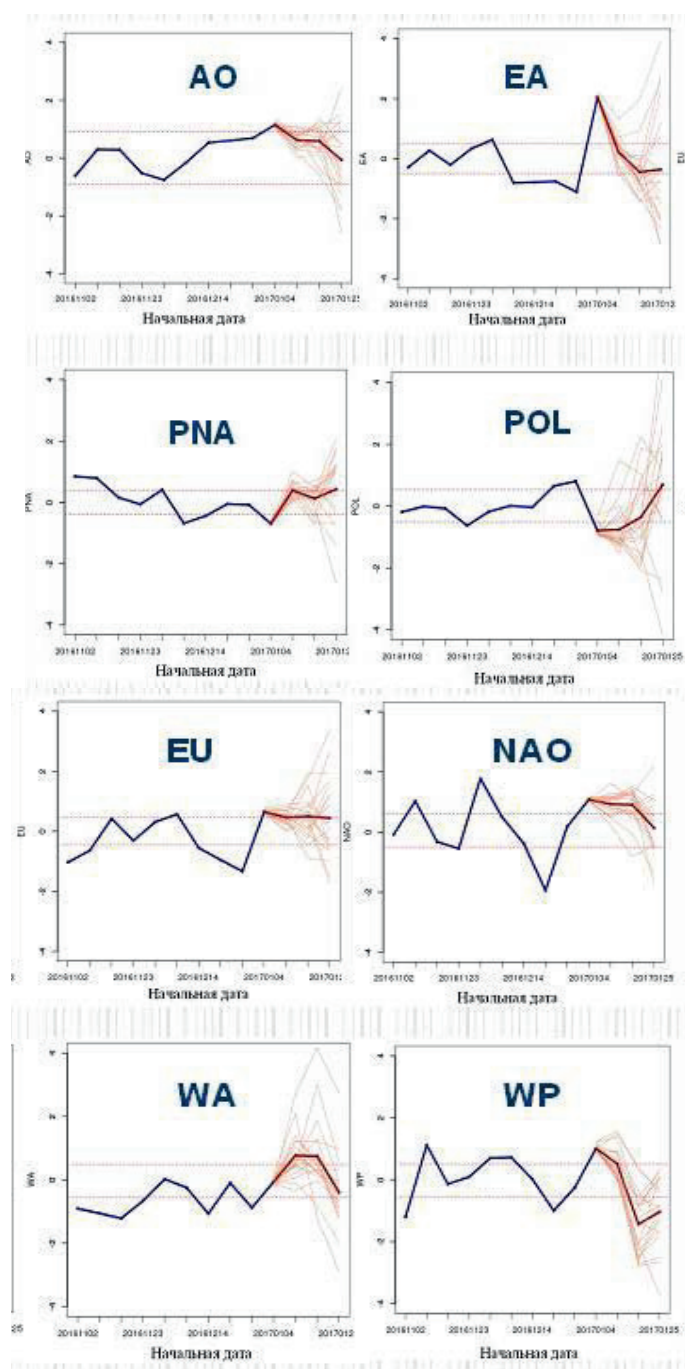


**Рис. 4.** Прогнозы индексов атмосферной циркуляции на недельных интервалах времени (синяя кривая – данные реанализа, красная – 20 членов ансамбля прогнозов, жирная красная – среднее по ансамблю).

Кроме PNA, выделены и другие моды низкочастотной изменчивости, влияющие на качество пентадных и декадных прогнозов. Аналогичные выводы о связи качества гидродинамических прогнозов с режимами атмосферной циркуляции получены и в ряде других исследований [5, 12, 13, 19–22, 26]. Ориентированный на режимы циркуляции подход, основанный на совместном использовании динамических прогнозов и синоптико-статистических методов может способствовать повышению качества долгосрочных прогнозов и увеличению «предела предсказуемости».

### Заключение

Рассмотрены основные особенности технологической линии долгосрочных метеорологических прогнозов, реализованной в ФГБУ «Гидрометцентр России» на сервере СЕАКЦ, в рамках которой составляются недельные и месячные прогнозы основных метеорологических величин. Вычислительное ядро схемы, развернутой на вычислительных ресурсах ГВЦ Росгидромета, составляет глобальная гидродинамическая модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ (совместная разработка Института вычислительной математики РАН и Гидрометцентра России). Ведется постоянная работа по созданию новых версий данной модели. В частности, улучшены блоки параметризации коротко- и длинноволновой радиации, облачности, пограничного слоя, описания льда, озонового слоя [15].

В целях повышения качества прогнозов используется мультимодельный подход, основанный на использовании моделей общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России и ГГО.

Последующая обработка ансамблевых прогнозов, поставляемых от разных моделей (в оперативном режиме формируются двадцать прогнозов по модели ПЛАВ и десять – по модели ГГО), позволяет устранить систематические ошибки моделей и улучшить качество прогнозов за счет простого объединения ансамблей.

Оценки качества прогнозов строятся с учетом рекомендаций ВМО, а также накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов в Гидрометцентре России. В рамках основной технологической линии производится мониторинг качества, позволяющий оценивать оправдываемость прогнозов в реальном режиме времени. При практическом использовании прогнозов необходимо учитывать оценки их качества.

Качество долгосрочных прогнозов сильно меняется в зависимости от региона, сезона и режима атмосферной циркуляции. В связи с этим в оперативном порядке с использованием различных индексов решается задача прогноза режимов циркуляции, более устойчивых и более предсказуемых, чем мгновенные состояния атмосферы. Построены сборные композитные карты с учетом различных фаз индексов, которые могут использоваться для уточнения долгосрочных прогнозов, а также для априорной оценки их качества.

Планируется дальнейшее развитие и усовершенствование технологии за счет введения новых блоков и программных средств. Основной акцент

при этом делается на усовершенствование гидродинамической модели ПЛАВ, а также проведение исследований источников потенциальной предсказуемости эволюции атмосферы на внутрисезонных временных масштабах. Особое внимание предполагается уделить исследованию предсказуемости экстремальных метеорологических явлений, с которыми связаны стихийные бедствия, наносящие большой ущерб экономике страны.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-37-00053 П) в Гидрометцентре России.

Методика анализа прогнозов индексов циркуляции, описанная в разделе 4, разработана при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-01227).

Поступила в редакцию 22.09.2017 г.

#### Список использованных источников

1. Багров Н.А., Кондратович К.В., Педь Д.А., Узрюмов А.И. Долгосрочные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 247 с.
2. Диаконис П., Эфрон Б. Статистические методы с интенсивным использованием ЭВМ // В мире науки. 1993. № 3. С. 60-72.
3. Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М.: ИВМ РАН, 2007. 283 с.
4. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть 1. Статистический анализ и гидродинамическое моделирование // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 5-22.
5. Крыжов В.Н., Горелиц О.В. Арктическая осцилляция и ее влияние на температуру и осадки Северной Евразии в XX веке // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 5-19.
6. Куликова И.А., Круглова Е.Н., Киктев Д.Б. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть 2. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 5-16.
7. Материалы семинара рабочей группы ВМО (29 января – 2 февраля 2007 г.). [http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/verif\\_web\\_page.html](http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/verif_web_page.html).
8. Мирвис В.М., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Новая технология ансамблевого гидродинамического прогноза на 45 суток и региональные оценки успешности прогнозов для Северной Евразии // Труды ГГО. 2014. Вып. 570. С. 5-33.
9. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558, С. 3-40.
10. Муравьев А.В. Стандартизированная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов. (SVS LRF) // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, лтд, 2010. С. 264-288. [http://method.hydromet.ru/publ/books/80\\_years/murav.pdf](http://method.hydromet.ru/publ/books/80_years/murav.pdf).
11. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 24-34.
12. Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Казначеева В.Д. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. Часть 1. Основные конструктивные и технические характеристики динамико-статистической схемы долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 28-36.
13. Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Казначеева В.Д. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. Часть 2. Условия эксперимента и результаты прогноза // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 5-15.
14. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ФАО ФОР, 2010. 111 с.
15. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М.,

- Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25-35.
16. Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В. Воспроизведение атмосферной циркуляции на сезонных масштабах новой версией полулагранжевой модели атмосферы // Известия РАН. ФАО. 2010. Т. 46, № 2. С. 149-160.
17. Уоллес Дж., Блэкмон М. Наблюдаемая низкочастотная изменчивость атмосферы. В кн. Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере / под ред. Б. Хоскинса, Р. Пирса. М.: Мир, 1988. С. 66-109.
18. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. М.: Финансы и статистика, 1988. 263 с.
19. Branstator G. Spatial filtering of daily and monthly mean forecasts // WMO/Td-No. 395. ICTP/WMO international technical conference on long-range weather forecasting research, Trieste, Italy, 8–12 April 1991. P. 35-38.
20. Deque M. 10-day predictability of the northern hemisphere winter 500-mb height by ECMWF operational model // Tellus. 1988. Vol. 40A. P. 26-36.
21. Kanamitsu M., Ebisuzaki W.I., Woollen J., Yang Shi-Keng, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2002. Vol. 83. P. 1631–1643.
22. Maedo S., Kudo T., Yamada S. Dynamical one-month forecast experiments with JMA global prediction model // Res. Act. Atm. Ocean. Model. Rep. No.18, January 1993. WMO/TD-No. 533. P. 6.35-6.36.
23. O'Lenic E.A., Livezey R.E. Relationships between systematic errors in medium range numerical forecasts and some of the principal modes of low-frequency variability of the northern hemisphere 70 mb circulation // Mon. Wea. Rev. 1989. Vol. 117, No. 6. P. 1262-1280.
24. Palmer T. Medium and extended range predictability and stability of the Pacific/North American mode. Quart // J. Roy. Met. Soc. 1988. Vol. 114. P. 691-713.
25. Sub-Seasonal to Seasonal Prediction Research Implementation Plan. [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/S2S\\_Implem\\_plan\\_en.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/S2S_Implem_plan_en.pdf)
26. Yamada S., Maeda S., Gambo K. Principal modes of atmospheric variability in the northern hemisphere winter and the role of their modes associated with the extended range forecasting // Res. Act. Atm. Ocean. Model. Rep. No. 23, February 1996. WMO/TD-No 34. P. 2.75-2.76.

## SUMMARIES

**Issue of detailed meteorological forecasts in North Eurasian Climate Centre (NEACC)/** Kiktev D.B., Tolstykh M.A., Zaripov R.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Tishenko V.A., Khan V.M. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 14-28.

The article describes the technology of weekly issues of global probabilistic and deterministic forecasts for a week and a month implemented in NEACC on the basis of a semi-Lagrangian global finite-difference model of the general atmospheric circulation of the Hydrometeorological Center of Russia (SLAV). The possibilities of implementing a multi-model approach based on the use of models of the general circulation of the atmosphere of Hydrometeorological Center of Russia and the Voeikov Main Geophysical Observatory are provided. The detailed scheme of air temperature and precipitation forecasts for 70 stations of CIS was created within the framework of the main technological line. The results of real-time forecast quality monitoring are given. As additional information, forecasts of indices characterizing the main modes of large-scale variability of atmospheric circulation in the northern hemisphere are used.

**Keywords:** hydrodynamic forecasts, multi-model ensembles, synoptic-statistical interpretation, indices of circulation, forecasts verification.

УДК 551.509

## **ПЯТИЛЕТНИЙ ОПЫТ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СРОК ДО 45 СУТОК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ГГО (ВЕРСИЯ MGO-3 T63L25)**

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

*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург  
mirvis@main.mgo.rssi.ru, meleshko@main.mgo.rssi.ru,  
lvova@main.mgo.rssi.ru, matugin@main.mgo.rssi.ru*

В статье анализируется опыт ГГО по прогнозированию средних недельных и месячных метеорологических условий на основе модели общей циркуляции атмосферы T63L25 на срок до 45 суток. Изложена технология еженедельного выпуска прогнозов на два месячных периода (с суточной и двухнедельной заблаговременностью) и еженедельной детализацией для первых четырех недель. Комплект прогнозов содержит глобальные сеточные значения аномалий в непрерывной шкале и вероятности 3-х градаций для пяти основных метеорологических элементов, а также прогнозы приземной температуры воздуха и осадков по 70 станциям Северо-Евразийского региона. Рассмотрены глобальные и региональные оценки качества прогнозов.

*Ключевые слова:* детализированный месячный метеорологический прогноз, модель общей циркуляции атмосферы, вероятностный прогноз, глобальные и региональные оценки качества прогнозов.

### **Введение**

Успехи гидродинамического моделирования процессов в атмосфере и климатической системе в целом, достигнутые в мировой науке на базе современных суперкомпьютерных технологий, обеспечили возможность использования моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА), а также совместных моделей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) в расчетах эволюции метеорологических условий на длительные сроки (месяц, сезон) с перспективой построения бесшовных технологий прогнозирования погоды и климата. Благодаря физической обоснованности, успешности и технологическим возможностям, включающим ансамблевые расчеты и вероятностные оценки неопределенности, методы месячных и сезонных прогнозов на основе МОЦА и МОЦАО находят активное применение в практике передовых прогностических центров, все больше вытесняя методы, полностью основанные на эмпирико-статистическом подходе. Попытки сравнения успешности гидродинамических и статистических прогнозов, предпринятые в ряде исследований [2, 6],

показывают, что качество прогнозов, выполненных на основе современных физически полных МОЦА, в среднем не только не уступает оценкам статистических прогнозов, но оказывается, как правило, существенно лучше. Однако следует признать, что степень неопределенности долгосрочных прогнозов остается весьма значительной, и при увеличении заблаговременности до 20–30 суток она приближается к естественной климатической изменчивости. При крайней практической заинтересованности в долгосрочных прогнозах, уровень их успешности не удовлетворяет запросам потенциальных потребителей.

Сложность и ресурсоемкость исследований по гидродинамическому долгосрочному прогнозу, глобальный охват рассматриваемых процессов потребовали объединения усилий в международном масштабе. В последние годы были инициированы многие совместные проекты, координирующие исследования передовых научных коллективов и нацеленные на построение мультимодельных ансамблевых прогнозов.

В России развитие методов ансамблевых гидродинамических прогнозов на месяц и сезон осуществляется в двух научных центрах Росгидромета – ФГБУ «Гидрометцентр России» (ГМЦ) и ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ГГО). В ГГО для исследований по климату и долгосрочному прогнозу поэтапно разрабатывались версии спектральной МОЦА с различным пространственным разрешением, которые прошли апробацию в международных экспериментах (AMIP-I, AMIP-II, SMIP, SMIP-HFP). Выпуск оперативных прогнозов на срок до сезона осуществляется в настоящее время на основе технологий, успешно прошедших совместные с ГМЦ оперативные испытания [3] и использующих версии МОЦА T42L14 [15] и T63L25 [4]. Прогнозы ГГО используются в прогностической деятельности ГМЦ и информационном обеспечении СЕАКЦ, участвуют в международном проекте по мультимодельному сезонному прогнозу АРСС [18]. В последние годы в ГГО создана также совместная модель динамики океана и атмосферы, объединяющая атмосферную модель T42L25 с блоком океанической циркуляции, разработанным в ИВМ РАН, которая успешно апробирована для прогнозирования на срок до 4 месяцев с использованием исторических данных реанализа за 22 года [11].

Традиционно месячные и сезонные прогнозы предполагают оценку метеорологических условий, осредненных за весь период прогноза (месяц или сезон). Более детальная информация содержится в краткосрочных и среднесрочных прогнозах, которые охватывают период не более 5–10 дней. За пределами этого срока, как правило, имеется только прогноз в целом на календарный месяц, который составляется накануне начала месяца. Анализ показывает, что успешность таких прогнозов во многом обеспечивается действием «атмосферной памяти», быстро угасающей на интервале 2–3 недель от выпуска прогноза. Увеличение заблаговременности, в котором крайне заинтересованы потенциальные потребители, приводит к существенному снижению качества прогнозов. В редких

случаях непредвиденная ломка атмосферных процессов в начале периода приводит к провалу месячного прогноза, который обреченно фиксируется прогнозистом. Потребители же оказываются лишенными адекватной прогностической оценки на дальнюю перспективу.

Источники предсказуемости, способные повысить качество прогнозов во временном интервале до 45–60 суток, являются предметом пристального внимания исследователей, поскольку с ними связаны главные надежды на возможность практического использования долгосрочных прогнозов при учете метеорологических и гидрологических условий в энергетике, сельском хозяйстве, на транспорте, в поддержании безопасного жизнеобеспечения населения. На повышение качества прогнозирования в указанном временном интервале нацелен международный проект «Subseasonal to Seasonal Prediction Project» (S2S) стартовавший в 2013 году под эгидой международных программ BMO WWRP/THORPEX/WCRP [23].

В данной статье подробно анализируется многолетний опыт ГГО по прогнозированию средних недельных и месячных метеорологических условий в интервале до 45 суток на основе МОЦА T63L25 в режиме еженедельного оперативного прогноза. Эти результаты сопоставляются с предварительными оценками, полученными на материале исторических прогнозов, частично опубликованными в [8].

## **Технология прогнозов и использованные данные**

### ***Характеристика модели и исходных данных***

Ядром прогностической технологии является физически полная глобальная спектральная МОЦА T63L25, подробное описание которой содержится в [4]. Горизонтальное разрешение модели  $1,9^\circ \times 1,9^\circ$ , приблизительно 190 км, по вертикали учитывается 25 уровней в сигма системе координат, шаг по времени составляет ~10 минут. Увеличение разрешения модели по сравнению с предшествующей версией T42L14 позволило более точно прогнозировать эволюцию начального состояния на периоде детерминированной предсказуемости, а также улучшить описание процессов в верхней тропосфере и нижней стратосфере. В новой версии модели использован прежний блок параметризаций основных физических процессов, за исключением учета гравитационно-волнового сопротивления и горизонтальной диффузии, которые зависят от разрешения модели и требуют специальной настройки. В результате валидации модели были изменены некоторые коэффициенты и условия, использующиеся в схемах параметризации физических процессов. Произведенные изменения позволили уменьшить систематические ошибки.

В качестве начальных данных о состоянии атмосферы, вводимых в модель на старте, используются данные объективного анализа атмосферных полей по сетке ( $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ), выполняемого в ГМЦ. При задании начального состояния температуры поверхности океана (ТПО) и

концентрации морского льда используются результаты их еженедельного анализа, размещаемые на сайте (<http://iridl.ldeo.columbia.edu> [20]).

Граничные условия формулируются в предположении постоянства начальных аномалий ТПО на всем периоде интегрирования, начальные аномалии концентрации морского льда удерживаются неизменными в течение 21 суток, с последующей релаксацией к климатическому распределению.

Для построения вероятностных прогностических распределений в технологии предусмотрен расчет ансамбля прогнозов, стартующих от слабо возмущенных начальных полей, построение которых, как и ранее, осуществлялось на основе выращивания возмущений с помощью модели [13]. В настоящее время используется ансамбль из девяти прогнозов, один из которых рассчитывается по невозмущенным начальным полям и восемь – по возмущенным.

Результаты расчетов эволюции глобальных прогностических полей, представленных в сетке  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ , для пяти характеристик: геопотенциала поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (SLP), температуры воздуха на уровне 850 гПа (T850) и у земли (TRSF), а также интенсивности атмосферных осадков (PREC), осредненные по суткам за 1–45 сутки, запоминаются и используются для формирования пакета выходного комплекта прогностической информации на этапе постобработки.

Все прогнозы по МОЦА T63L25 выполнялись на суперкомпьютерном комплексе Kraftway (кластере, 108 узлов) с пиковой производительностью 0,7 Tflor/s. В настоящее время технология реализована также на сервере SuperMicro (4 процессора по 8 ядер). Время счета одного ансамблевого прогноза составляет около 6–7 часов.

### ***Состав прогностических величин***

Выходной прогностический комплект по каждой характеристике включает поля аномалий, осредненных по времени для шести прогностических периодов: 1, 2, 3, 4-ю недели (2–8, 9–15, 16–22, 23–29 сутки) и два месячных временных отрезка (2–31 и 16–45 сутки), именуемых в дальнейшем, соответственно, *месяц 1* и *месяц 2*. В следующем выпуске прогноза все периоды сдвигаются на одну неделю. Величина прогностической аномалии в каждой точке рассчитывается по результатам девяти ансамблевых прогнозов как отклонение среднего по ансамблю значения, скорректированного на величину систематической ошибки, от соответствующей нормы (среднего значения) эталонного климатического ряда. Таким образом, величина аномалии является выборочной оценкой математического ожидания прогностического вероятностного распределения. Кроме этого, по ансамблю прогнозов рассчитываются вероятности попадания аномалии в три заранее установленные градации («ниже нормы», «норма», «выше нормы»). Границами градаций являются

процентили 33,3 % распределений эталонных климатических рядов. Таким образом, выходной комплект включает для каждой из пяти метеорологических характеристик в каждой точке глобальной сетки  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  прогностические оценки четырех величин (средняя аномалия и три значения вероятности осуществления градаций «ниже нормы», «норма», «выше нормы») в каждом из шести периодов прогноза.

Технология предусматривает также детализацию прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков для отдельных пунктов. В настоящее время прогнозы рассчитываются по сети 70 станций, расположенных в Северо-Евразийском регионе. Расчеты суточных прогностических значений в пунктах осуществляются по сеточным данным четырех ближайших узлов посредством билинейной интерполяции.

### *Оценки эталонного климата*

Важной частью прогностической системы является подготовка параметров эталонного климата. Необходимо отметить, что в каждой точке прогноза необходимо иметь параметры, характеризующие распределение характеристик недельного и месячного осреднения для любой фазы в годовом цикле. Подготовка этих данных включала расчеты и обработку эталонных временных рядов по историческим архивам. Для глобальных данных использовались архивы Реанализа 2 [17] за период с 1981 по 2010 год, а для данных на станциях – архивы суточных данных ВНИИГМИ-МЦД [19]. К сожалению, использование периода 1981–2010 гг. для станций оказалось затруднительным по причине многочисленных пропусков в данных наблюдений с начала 90-х годов прошлого столетия, поэтому климатические параметры для станций определялись за 30-летие (1961–1990 гг.).

Для расчета климатических параметров анализировались 30-летние временные ряды, относящиеся к одноименным календарным отрезкам. Начало отрезков (периодов осреднения) смещалось по суткам, пробегая все 365 дней года. Таким образом, по каждой характеристике анализировалось 365 рядов средненедельных значений и столько же – среднемесячных. Кажущийся более простым путь – определение параметров климата недельных или месячных средних на основе преобразования характеристик климата суточных значений возможен только в отношении норм. Пересчет параметров изменчивости требует учета временной связности, меняющейся и в пространстве, и в сезонном ходе, корректный учет которой весьма сложен.

Полученные выборочные значения параметров климата содержат заметную шумовую составляющую, под влиянием которой их годовой ход не является гладким, а испытывает дрожание. Фильтрация выборочных ошибок производилась посредством аппроксимации годового хода параметров климата усеченным разложением Фурье с использованием первых четырех гармоник. Более подробно о подготовке параметров эталонного климата см. [8].

### ***Коррекция систематических ошибок***

Необходимым этапом подготовки прогнозов на основе гидродинамических моделей является оценка и коррекция систематических ошибок. Эти ошибки возникают вследствие отличия климата модельной атмосферы от реального климата. На периоде прогноза, в условиях неустановившегося еще климата модели, различие климатов меняется (дрейфует) во времени. Для оценки систематических ошибок, соответствующих каждому временному интервалу, необходимо иметь ряды исторических прогнозов (hindcasts) и соответствующих им фактических данных.

Выполнение многолетних серий исторических прогнозов является исключительно ресурсоемкой задачей, поскольку требуется получить оценки для каждого дня (календарной даты) выпуска прогноза в годовом цикле. Распространенным способом коррекции смещения является представление конечных прогнозов в виде отклонений от модельного климатического среднего. Для оценки параметров модельного климата на дату старта прогноза используются ряды исторических прогнозов, рассчитанных от той же даты.

В технологии ГГО использована несколько видоизмененная и более экономичная стратегия. Непрерывный годовой ход систематических ошибок для каждой прогностической переменной воспроизводился по историческим рядам прогнозов, рассчитанных с полумесячной дискретностью за 1982–2001 гг. (всего 480 прогнозов) на основе Фурье аппроксимации средних разностей прогноз – факт [7]. Такой подход позволяет точнее воспроизвести годовой ход ошибок, поскольку масштаб колебаний для разностей модельных и фактических климатических средних существенно меньше колебаний каждого из них, а выборочные ошибки средней разности положительно коррелированных величин меньше, чем ошибки самих средних.

### ***Подготовка вероятностных прогнозов.***

Для оценки вероятности попадания прогностической величины в заданную градацию осуществляется подсчет числа индивидуальных ансамблевых прогнозов, попавших в эту градацию, с последующим делением на общее число членов ансамбля. При этом рассматриваются индивидуальные некорректированные прогнозы, а границы градации соответствуют модельному климатическому распределению. При ансамбле из девяти прогнозов значения вероятностей кратны  $1/9$ , т. е. определяются довольно грубо.

В прогнозах приземной температуры воздуха по станциям был реализован альтернативный вариант расчета вероятностей, основанный на предположении о нормальном распределении ансамбля и корректировке обоих параметров – и среднего, и стандартного отклонения. Подробное изложение этого подхода содержится в [9]. В исследовании [10] показано, что корректировка параметра изменчивости положительно сказывается на

оценках вероятностных прогнозов, а также то, что использованный метод коррекции не уступает методу, основанному на байесовской модели осреднения (ВМА).

### **Оценки успешности прогнозов**

Оценки успешности предполагают сравнение прогноза с фактом, установленным по данным наблюдений. Для потребителей часто важны количественные значения ошибок прогнозов и процент прогнозов, которые при заданном допуске классифицируются как оправдавшиеся. Исследователи, оценивая полезность долгосрочных прогнозов, интересуются, уточняют ли они климатическую информацию и, если да, то насколько.

Методическими указаниями [5] для количественной оценки прогнозов, данных в непрерывной шкале, рекомендованы расчеты средних ошибок (арифметических, абсолютных, квадратических), имеющих размерность, и безразмерных критериев: относительных ошибок, соотносящих ошибки прогноза с климатической изменчивостью, коэффициентов корреляции прогностических и фактических аномалий, а для прогнозов бинарного признака (знака аномалии) – индекс  $\rho$ .

Активизация международного сотрудничества в области долгосрочных прогнозов потребовала стандартизации подходов и критериев оценки прогнозов, в том числе для прогнозов, данных в вероятностной форме. Результаты этой деятельности сформулированы в [21] и подробно прокомментированы в [12]. В качестве первоочередных показателей были рекомендованы среднеквадратический показатель оправдываемости (MSSS), характеризующий уменьшение среднего квадрата ошибки методического прогноза относительно ошибки климатического прогноза, а также для категориальных вероятностных прогнозов – сравнительная оперативная характеристика ROC (relative operating characteristic), соотносящая доли оправдавшихся прогнозов и ложных тревог.

Исходя из этих рекомендаций для анализа успешности прогнозов рассчитывались средние ошибки величины аномалии (в непрерывной шкале): арифметические ( $ME$ ), квадратические ( $RMSE$ ), относительные ( $Q$ ), коэффициенты корреляции аномалий ( $AC$ ), индексы  $\rho$ , показатель MSSS. При анализе качества вероятностных прогнозов – ROC.

**Эталонные фактические значения** аномалий для оценки глобальных прогнозов в сетке рассчитывались исходя из 6-часовых данных Реанализа 2, а фактические значения температуры воздуха и осадков на станциях – по суточным данным поддерживаемой ГМЦ базы МАКТ [1].

### **Результаты независимых испытаний технологии прогнозов**

В [8] были сопоставлены результаты оценок прогнозов двух серий исторических прогнозов: ряда 1982–2001 гг. (480 прогнозов), использованного для оценки систематических ошибок, и независимой выборки

2002–2011 гг. (522 прогноза). При этом были рассмотрены только прогнозы приземной температуры воздуха и осадков в Северо-Евразийском регионе. Начиная с 2012 года в рамках оперативных испытаний, организованных совместно с ГМЦ, технология прогнозов была запущена в режиме оперативного еженедельного прогноза. В период с апреля 2012 г. по март 2017 г. было выпущено 259 прогнозов, результаты которых передавались в ГМЦ, до начала прогностического периода. В рамках данной статьи рассмотрены основные результаты этой серии прогнозов по всей совокупности прогностических переменных. Успешность сеточных глобальных прогнозов оценивалась по глобусу в целом, а также по регионам: тропики ( $20^\circ$  с. ш.  $\times$   $20^\circ$  ю. ш.), северные экстратропики ( $90^\circ$  с. ш.  $\times$   $20^\circ$  с. ш.) и Северо-Евразийский регион\*.

Отметим, что критерии оценки прогнозов могут рассчитываться на основе осреднения по пространственной области (для каждого прогноза), с последующим осреднением по совокупности прогнозов, или на основе осреднения по совокупности прогнозов в каждой точке, с последующим осреднением по пространству. И в том, и в другом случаях при рассмотрении критериев, характеризующих ошибки прогнозов в их абсолютном выражении ( $f_{i,j} - x_{i,j}$ , где  $f_{i,j}$  – значение  $i$ -го прогноза в точке  $j$ ;  $x_{i,j}$  – соответствующее фактическое значение), обобщаются данные, неоднородные по климатической изменчивости. Рекомендация [21], не смешивать результаты проверок, относящиеся к разным сезонам, требует для получения статистически надежных выводов длительных (многолетних) испытаний, которые обычно не практикуются.

При анализе успешности прогнозов по относительно коротким временным рядам (5–10 лет) целесообразно ориентироваться на относительные критерии  $Q$  и  $AC$ . Если перейти к рассмотрению стандартизированных прогностических и фактических аномалий ( $\hat{f}_i$  и  $\hat{x}_i$ ), выраженных в долях соответствующего эталонного значения стандарта климатической изменчивости ( $sd$ ), то относительная ошибка методического прогноза определяется как средний квадрат их разности:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - \hat{x}_i)^2.$$

$$\text{Для климатического прогноза } \hat{f}_i = 0, \text{ а } Q_{cl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (-\hat{x}_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_i)^2$$

характеризует средний квадрат стандартизированных фактических аномалий в испытательной выборке. При расчете по выборке эталонного климата  $Q_{cl}=1$ . Оценки  $Q_{cl}$  по данным испытательной выборки

---

\* Регион включает сферические трапеции:  $77,5^\circ$ – $42,5^\circ$ с.ш.,  $20^\circ$ – $145^\circ$ в.д.,  $77,5^\circ$ – $50^\circ$ с.ш.,  $147,5^\circ$ – $180^\circ$ в.д. (933 точки)

отличаются от единицы и тем больше, чем большими аномалиями характеризовались фактические атмосферные условия.

Для оценки мастерства методических прогнозов, по сравнению с климатом по результатам испытательной выборки 2012–2017 гг., использовался критерий  $QS$ :

$$QS = 1 - \frac{Q}{Q_{cl}},$$

а также средний коэффициент пространственной корреляции прогностических и фактических аномалий  $AC$ .

Результаты глобальных и региональных оценок прогнозов для каждой из прогнозируемых переменных (H500, T850, T2м, SLP, PREC) по критериям  $QS$  и  $AC$  за 2012–2017 гг. обобщены на рис. 1. Столбчатыми диаграммами, объединенными в группы, слева направо показаны средние оценки для каждого из шести периодов прогноза. Внутри каждой группы слева направо представлены оценки, рассчитанные по глобусу в целом, тропикам, северным экстратропикам и Северо-Евразийскому региону.

На графиках видно закономерное снижение качества прогнозов по мере увеличения заблаговременности от первой недели к четвертой и от месяца 1 к месяцу 2. Вместе с тем результаты показывают, что для всех переменных и прогностических периодов средние значения  $AC$  значимо положительны. Это касается всех рассмотренных регионов. В тропиках заметно относительно более медленное снижение  $AC$ , особенно при рассмотрении прогнозов давления на уровне моря и приземной температуры воздуха, изменчивость которой испытывает демпфирующее влияние океана.

Критерий  $QS$  сохраняет положительные значения за пределами двухнедельного интервала только для прогнозов H500 (кроме оценок для Северо-Евразийского региона) и T2м, причем прогнозы T2м на 4-ю неделю в Северо-Евразийском регионе по  $Q$  уже не отличаются от климата. Прогнозы T850 уступают по качеству прогнозам T2м, хотя и имеют положительные оценки  $QS$  для обоих месячных периодов. Для прогнозов SLP значения  $QS$  положительны или равны нулю только на периодах 1-й и 2-й недель. В северных экстратропиках и Северо-Евразийском регионе слабо положительные значения  $QS$  получены также для месяца 1. Самые низкие оценки получены для прогнозов количества осадков. Все оценки  $QS$  за пределами первой недели оказались отрицательными, а в тропиках плохими были прогнозы даже на первую неделю. Следует заметить, что осадки, с их большой пространственно-временной изменчивостью, являются трудной характеристикой как для прогнозирования, так и для оценки прогнозов. Применение к ним выше указанных критериев, строго говоря, некорректно по причине существенного отличия их распределения от нормального. Более корректны результаты оценки вероятностных прогнозов трех градаций осадков, рассмотренные далее.

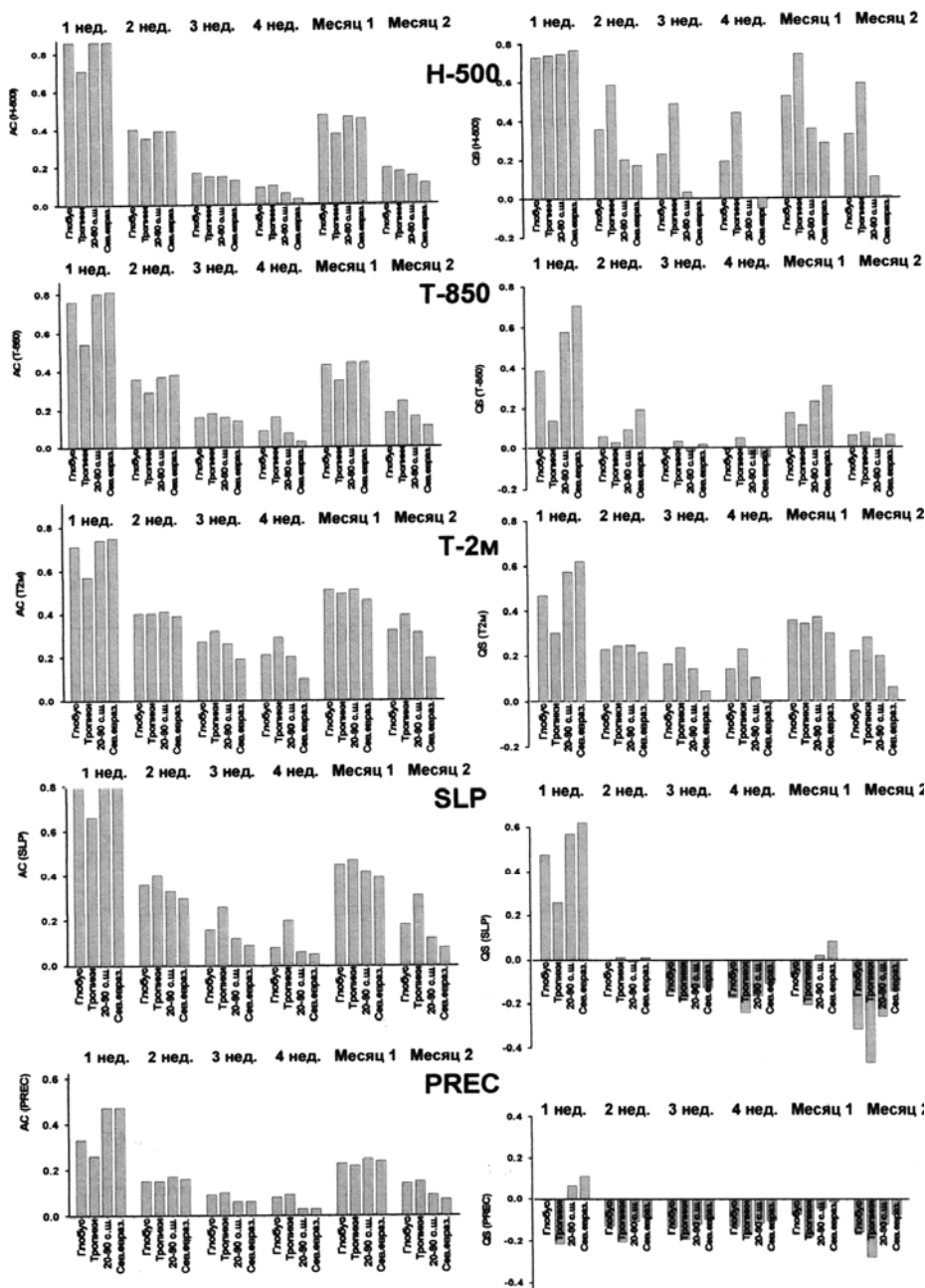


Рис. 1. Средние ошибки прогнозов по критериям AC (слева) и QS (справа) за 2012–2017 гг.

Подводя итог можно констатировать, что наиболее успешными являются результаты прогнозов H500 и приземной температуры воздуха. Сочетание положительных значения  $AC$  и неотрицательных  $QS$  свидетельствует о том, что эти прогнозы для всех периодов уточняют климатическую информацию. Важно, что этот результат получен при использовании эталонного климата периода 1981–2010 гг., практически примыкающего к началу оперативных испытаний.

Большой интерес представляет анализ успешности прогнозов приземной температуры на станциях по данным наблюдений. Учитывая то, что характер изменчивости температуры воздуха существенно меняется в пространстве и в годовом ходе, целесообразно сравнивать и обобщать стандартизированные прогностические и фактические аномалии. На рис. 2 а показано совместное распределение стандартизированных прогностических ( $\hat{f}_i$ ) и фактических ( $\hat{x}_i$ ) аномалий, построенное по всем случаям станционных месячных прогнозов за 2012–2017 гг., составленных с нулевой заблаговременностью. Распределение прогностических аномалий характеризуется относительно меньшим рассеянием (по сравнению с рассеянием фактических аномалий). Это во многом объясняется тем, что прогностические аномалии являются результатом осреднения по ансамблю прогнозов. Средние значения обоих частных распределений близки по величине и оба смещены относительно нуля в область положительных аномалий. Коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими аномалиями для этого периода составил 0,54.

Удобным способом графического представления параметров совместного распределения прогностических и фактических аномалий является диаграмма Тейлора [22]. Положение каждой точки на диаграмме определяется значениями стандартного отклонения (радиальное расстояние до начала координат) и коэффициента корреляции между прогностическими и фактическими аномалиями (косинус углового расстояния). Компактное представление результатов на диаграмме Тейлора особенно удобно при сравнении большого набора выборок, для разных периодов и разных методик. На диаграмме (рис. 2 б) представлены результаты оценок для прогнозов T2м на станциях, полученные по историческим прогнозам 2002–2011 гг. (красным цветом) и оперативным прогнозам 2012–2017 гг. (синим цветом). Оценки прогнозов на 1, 2, 3, 4-ю недели показаны кружками с соответствующими цифрами. Закрашенными квадратами с цифрами 5 и 6 показаны результаты прогнозов на месяц 1 и месяц 2 соответственно. Для приведения результатов к одному масштабу значения стандартных отклонений каждой выборки выражены в долях стандартного отклонения эталонных данных. Эталонным данным соответствует кружок, отмеченный на горизонтальной оси на единичном расстоянии от начала координат. Расстояние между этой точкой и точками прогнозов характеризует величину централизованной квадратической ошибки прогнозов.

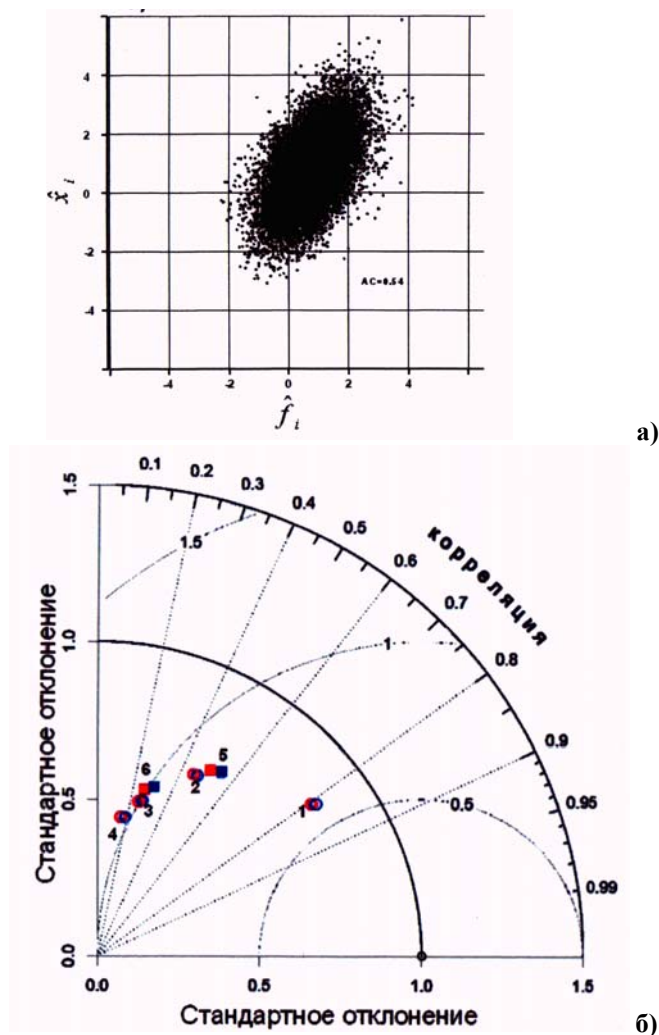


**Рис. 2.** Совместное распределение стандартизированных прогностических и фактических аномалий: совокупность станционных прогнозов на месяц с нулевой заблаговременностью за 2012–2017 гг. (а); диаграмма Тейлора по данным прогнозов за 2002–2011 гг. (красный цвет) и 2012–2017 гг. (синий цвет), результаты недельных прогнозов на 1, 2, 3, 4 недели отмечены кружками и цифрами (номер недели), результаты прогнозов на месяц 1 и месяц 2 отмечены закрашенными квадратами и цифрами 5 и 6 соответственно (б).

Рис. 2 б наглядно показывает, что красные и синие значки почти совпадают. Следовательно, качество оперативных прогнозов 2012–2017 гг. по сравнению с данными исторической выборки 2002–2011 гг. не изменилось. При переходе от прогнозов на начало месяца (1-я неделя) к концу (4-я неделя), так же как и при увеличении заблаговременности в

месячном прогнозе, характерно последовательное уменьшение стандартных отклонений прогностических аномалий и коэффициентов корреляции. Центрированные квадратические ошибки при этом увеличиваются и приближаются для 4-й недели и месяца 2 к единице, соответствующей в данном случае уровню ошибок климатического прогноза. Коэффициенты корреляции между прогностическими и фактическими аномалиями уменьшаются от 0,8 для 1-й недели до 0,2 для 4-й недели.

Примеры распределений стандартизированных ошибок методических прогнозов ( $\hat{f}_i - \hat{x}_i = (f - x)/sd$ ) в сравнении с распределениями ошибок климатического прогноза показаны на гистограммах рис. 3. Преимущество методических прогнозов состоит в уменьшении диапазона возможных ошибок и повторяемости на краях распределения, при увеличении повторяемости ошибок, близких к нулю. Особенно хорошо это заметно по прогнозам на 1-ю неделю, но прослеживается и в месячных прогнозах, включая месячный прогноз с 2-недельной заблаговременностью. Графики демонстрируют также выраженное смещение ошибок климатического прогноза влево, являющееся следствием глобального потепления.

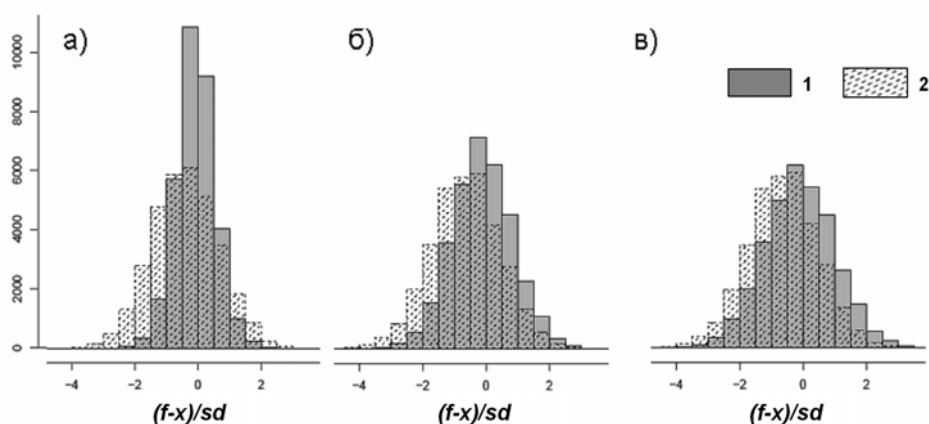


**Рис. 3.** Гистограммы распределения (частота) ошибок методических(1) и климатических (2) прогнозов Т 2м на 1 неделю (а), месяц 1 (б) и месяц 2 (в) по данным на станциях североазиатского региона за 2002–2011 гг.

На рис. 4 показаны эмпирические функции распределения ошибок, построенные по тем же прогнозам за два испытательных периода: 2002–2011 и 2012–2017 гг. Распределения ошибок методических прогнозов по данным обеих выборок практически совпадают. От распределения ошибок климатических прогнозов они отличаются отсутствием смещения и более крутым перегибом. Что касается ошибок климатических прогнозов, то в пятилетие 2012–2017 гг. смещение их распределения заметно увеличилось.

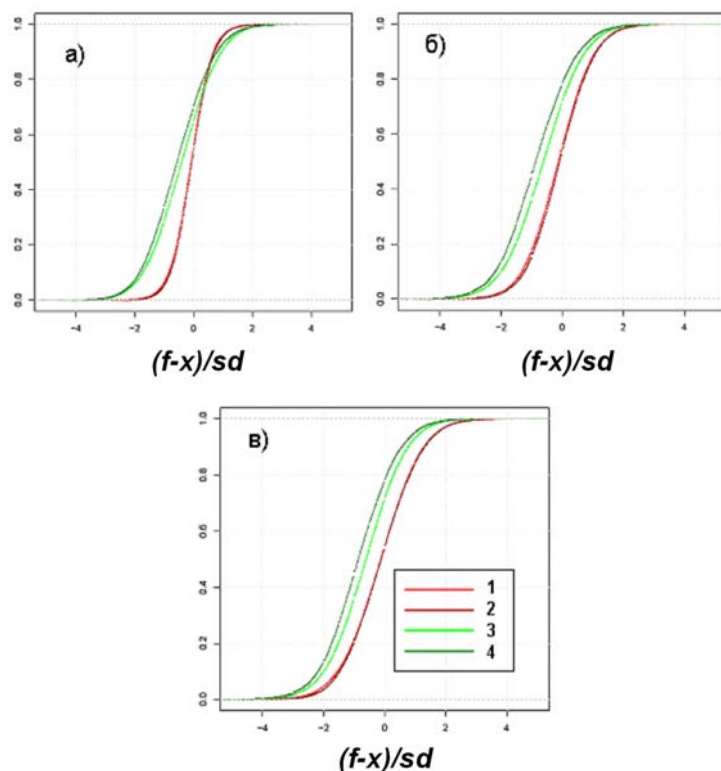


**Рис. 4.** Эмпирические функции распределения ошибок методических (1, 2) и климатических (3, 4) прогнозов T2м на 1-ю неделю (а); месяц 1 (б); месяц 2 (в) по данным на станциях Северо-Евразийского региона за 2002–2011 (1, 3) и 2012–2017 гг. (2, 4).

В процессе испытаний осуществлялся также традиционный мониторинг качества прогнозов величины аномалии для каждого выпуска по критериям  $ME$ ,  $RMSE$ ,  $Q$ ,  $AC$ ,  $RO$ , которые рассчитывались по заданной пространственной области. Для каждого выпуска прогноза параллельно оценивались ошибки климатических прогнозов по соответствующим нормам эталонного климата ( $ME_c$ ,  $RMSE_c$ ,  $Q_c$ ). Прогнозы по Северо-Евразийскому региону оценивались и по данным на станциях, и по сеточным значениям\*. Полученные средние за 2012–2017 гг. оценки по всем критериям представлены в табл. 1.

Данные табл. 1 показывают, что по критериям  $ME$ ,  $RMSE$ ,  $Q$ ,  $AC$  оценки методических прогнозов, рассчитанные по станциям и по сетке, различаются мало. Различие соответствующих оценок климатического

\* При обобщении по территории в сеточные данные вводились веса, пропорциональные косинусу широты, данные станций обобщались с равными весами.

прогноза весьма значительно. Климатические прогнозы на основе эталонного климата 1981–2010 гг., использованного для сеточных данных, имеют существенно лучшие оценки, чем оценки прогнозов по климату 1961–1990 гг., использованному для сети станций. Эта разница нашла также отражение в различии оценок методических прогнозов по  $\rho$ .

**Таблица 1.** Оценки прогнозов аномалий температуры воздуха на территории Северной Евразии (2012–2017 гг.)

| Период прогноза                                                   | $ME/MEc$ , °C | $RMSE/RMSEc$ , °C | $Q/Qc$    | $AC$ | $\rho$ |
|-------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------|-----------|------|--------|
| По данным 70 станций (эталонный климат 1961–1990 гг.)             |               |                   |           |      |        |
| 1 неделя                                                          | -0,13/-1,70   | 2,06/3,95         | 0,38/1,38 | 0,77 | 0,67   |
| 2 неделя                                                          | -0,12/-1,77   | 3,18/3,95         | 0,89/1,38 | 0,39 | 0,44   |
| 3 неделя                                                          | -0,15/-1,70   | 3,55/3,95         | 1,08/1,38 | 0,19 | 0,37   |
| 4 неделя                                                          | -0,15/-1,69   | 3,66/3,94         | 1,14/1,37 | 0,13 | 0,33   |
| Месяц 1                                                           | -0,15/-1,71   | 2,01/2,88         | 0,89/1,95 | 0,46 | 0,59   |
| Месяц 2                                                           | -0,23/-1,70   | 2,36/2,87         | 1,20/1,94 | 0,23 | 0,51   |
| По данным в узлах сетки 2,5°×2,5°(эталонный климат 1981–2010 гг.) |               |                   |           |      |        |
| 1 неделя                                                          | -0,22/-0,78   | 2,01/3,36         | 0,42/1,11 | 0,75 | 0,60   |
| 2 неделя                                                          | -0,11/-0,79   | 2,95/3,36         | 0,87/1,11 | 0,39 | 0,34   |
| 3 неделя                                                          | -0,07/-0,78   | 3,27/3,36         | 1,05/1,10 | 0,19 | 0,22   |
| 4 неделя                                                          | -0,11/-0,78   | 3,36/3,35         | 1,11/1,10 | 0,10 | 0,17   |
| Месяц 1                                                           | -0,13/-0,78   | 1,89/2,30         | 0,82/1,17 | 0,46 | 0,43   |
| Месяц 2                                                           | -0,17/-0,78   | 2,19/2,30         | 1,09/1,16 | 0,19 | 0,27   |

Сравнение методических и климатических прогнозов показывает, что информация методических прогнозов T2м для всех периодов прогноза существенно точнее, чем ориентация на нормы 1961–1990 гг. (данные станций). Оценки успешности относительно климата 1980–2010 гг. (сеточные данные) также свидетельствуют о статистически значимом\*\* преимуществе методических прогнозов, за исключением оценок по  $RMSE$  и  $Q$  на 4-ю неделю.

Потенциального потребителя, постоянно пребывающего в одном и том же месте, больше интересуют оценки прогнозов по временным рядам в конкретной точке. Однако для получения статистически надежных результатов локальных оценок успешности требуется использование многолетних рядов прогнозов. Опыт показал, что географическое распределение оценок по результатам 5 или 10-летних рядов, даже в годовом осреднении, меняется от периода к периоду. Так, коэффициенты пространственной корреляции между оценками  $AC$  или  $Q$  по 70 станциям за 2002–2011 и 2012–2017 гг. составляют  $\sim 0,3$ . Поэтому имело смысл

\*\* Статистическая значимость различий оценивалась посредством парного двухвыборочного  $t$ -критерия

обобщение оценок за весь имеющийся ряд, включая исторические прогнозы с 1982 года. Географическое распределение оценок  $Q$  и  $AC$ , полученных на станциях в месячных прогнозах с нулевой заблаговременностью в среднем за период 1982–2017 гг., показано на рис. 5. Видно, что на большей части территории ошибки  $Q$  меньше 0,9, а коэффициенты корреляции больше 0,5. Относительно худшим качеством обладают прогнозы на северной и южной периферии рассмотренного региона и на Дальнем Востоке.

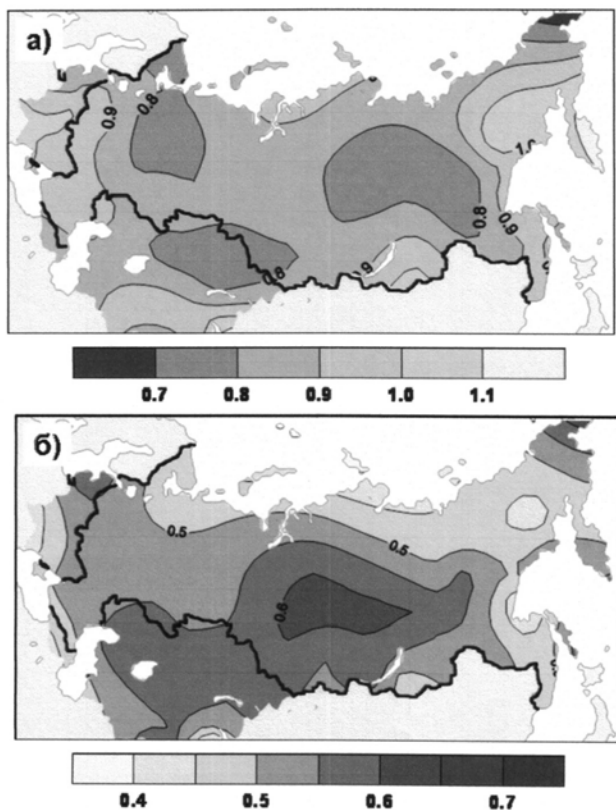


**Рис. 5.** Карты-схемы географического распределения оценок успешности прогнозов Т2м в среднем за 1982–2017 гг. по критериям  $Q$  (а) и  $AC$  (б).

### ***Успешность вероятностных прогнозов.***

Многоаспектная оценка качества вероятностных прогнозов предполагает анализ точности или надежности оценки вероятностей, разрешающей способности и категоричности прогнозов, способность прогностической системы к разделению (дискриминации) явлений при разном уровне пороговой вероятности и др.

Способность прогностической системы к дискриминации событий оценивается критерием *ROC* (relative operating characteristic) [16]. Этот критерий характеризует соотношение доли предсказанных явлений ( $h$ ) и ложных тревог ( $f$ ) при разных уровнях пороговой вероятности разделения событий для принятия решений. При анализе *ROC* для вероятностных прогнозов рассматриваются кривые изменения  $h$  и  $f$  по мере уменьшения пороговой вероятности. На рис. 6 приведены примеры кривых *ROC*, построенные по сеточным прогнозам приземной температуры воздуха и осадков в Северо-Евразийском регионе за 2012–2017 гг. Если  $h > f$ , точки кривой лежат выше главной диагонали и интегральный критерий *AROC*, равный площади под кривой, больше 0,5 (уровень климатического прогноза).

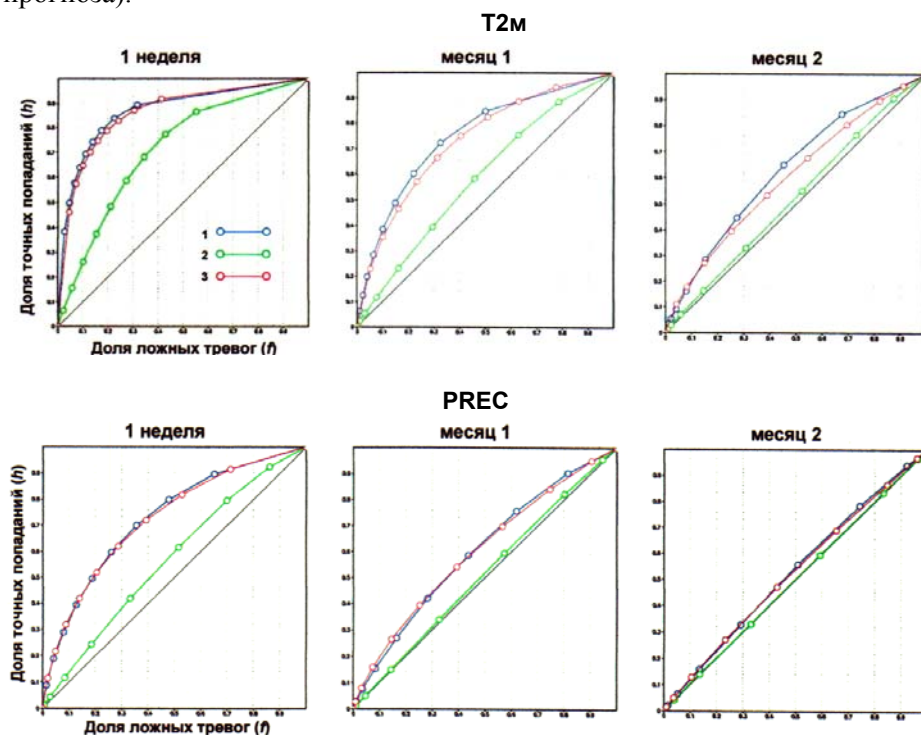


**Рис. 6.** Кривые *ROC* вероятностных прогнозов трех градаций аномалий T2m и PREC, построенные по результатам сеточных прогнозов для Северо-Евразийского региона за 2012–2017 гг. Градации: 1 – «ниже нормы», 2 – «норма», 3 – «выше нормы».

Результаты расчетов критерия *AROC* вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха и осадков по Северо-Евразийскому региону за 2012–2017 гг. для всех шести периодов представлены в табл. 2. Для каждой градации представлены два столбца оценок: по сеточным прогнозам (1) и оценки по 70 станциям (2). Сравнение показывает, что

результаты этих оценок очень хорошо согласуются между собой. Общий вывод, который можно сделать по тем и другим данным, состоит в том, что вероятностные прогнозы по температуре воздуха для всех периодов прогноза имели оценки *AROC*, существенно превосходящие 0,5 (уровень климатического прогноза). Прогнозы осадков были относительно успешными 1, 2 недели и месяц с нулевой заблаговременностью, особенно в части прогнозов градаций «выше/ниже нормы». Таким образом, несмотря на весьма неудачные прогнозы аномалий количества осадков в непрерывной шкале, вероятностные прогнозы осадков содержат незначительную долю полезной информации.

**Таблица 2.** Успешность вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха и осадков на территории Северной Евразии за 2012–2017 гг. по критерию *AROC*

| Период прогноза                      | Ниже нормы |       | Норма |       | Выше нормы |       |
|--------------------------------------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|
|                                      | (1)        | (2)   | (1)   | (2)   | (1)        | (2)   |
| <b>Приземная температура воздуха</b> |            |       |       |       |            |       |
| 1 неделя                             | 0,867      | 0,904 | 0,712 | 0,769 | 0,859      | 0,893 |
| 2 неделя                             | 0,713      | 0,728 | 0,570 | 0,598 | 0,711      | 0,714 |
| 3 неделя                             | 0,626      | 0,625 | 0,534 | 0,540 | 0,615      | 0,610 |
| 4 неделя                             | 0,580      | 0,578 | 0,517 | 0,525 | 0,574      | 0,568 |
| Месяц 1                              | 0,750      | 0,777 | 0,584 | 0,642 | 0,732      | 0,752 |
| Месяц 2                              | 0,631      | 0,621 | 0,522 | 0,565 | 0,602      | 0,617 |
| <b>Осадки</b>                        |            |       |       |       |            |       |
| 1 неделя                             | 0,726      | 0,721 | 0,567 | 0,555 | 0,721      | 0,710 |
| 2 неделя                             | 0,569      | 0,570 | 0,506 | 0,509 | 0,571      | 0,563 |
| 3 неделя                             | 0,524      | 0,514 | 0,502 | 0,506 | 0,527      | 0,521 |
| 4 неделя                             | 0,507      | 0,512 | 0,499 | 0,500 | 0,517      | 0,507 |
| Месяц 1                              | 0,602      | 0,589 | 0,513 | 0,512 | 0,602      | 0,578 |
| Месяц 2                              | 0,532      | 0,516 | 0,499 | 0,500 | 0,527      | 0,515 |

*Примечание:* (1) – оценки по сеточным данным; (2) – оценки по станциям.

Наглядным способом анализа надежности, разрешения и категоричности прогнозов является рассмотрение диаграмм достоверности, совмещенных с гистограммами повторяемости прогностических вероятностей. На рис. 7 представлен пример диаграммы, построенной по результатам оперативных вероятностных прогнозов T2м для Северо-Евразийского региона (сеточные данные) на месяц с нулевой заблаговременностью. Графики показывают, насколько фактическая частота, рассчитанная по группе прогнозов в заданном интервале вероятностей, соответствовала прогнозу. Синие, зеленые и красные линии соответствуют прогнозам градаций: «ниже нормы», «норма» и «выше нормы» соответственно. Столбчатые гистограммы, изображенные на врезках синим, зеленым и красным цветом, показывают относительные частоты прогнозов каждой градации, соответствующих заданному интервалу вероятностей.

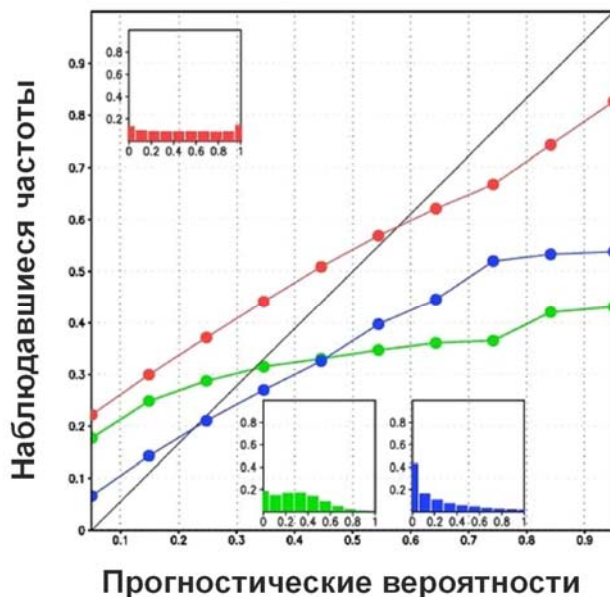


**Рис. 7.** Диаграммы достоверности вероятностных прогнозов трех градаций аномалий T2м, построенные по результатам сеточных прогнозов на месяц с нулевой заблаговременностью за 2012–2017 гг. для Северо-Евразийского региона. Синие линии – прогнозы градации «ниже нормы»; зеленые линии – «норма»; красные – «выше нормы».

Рис. 7 показывает, что в группах, прогнозирующих крайние градации выше/ниже нормы, имеется хорошо выраженная корреляция между прогностической вероятностью и фактической частотой события. Тем не менее при малых прогностических вероятностях фактические частоты превышали уровень прогностической вероятности, а в группах прогнозов, данных с большой вероятностью, оказывались заметно меньше. Для прогнозов градации норма связь прогностических и фактических частот выражена слабо.

Видно также, что фактические частоты осуществления градации «выше нормы» во всех группах прогнозов превышали фактические частоты градации «ниже нормы». Эта особенность связана с потеплением климата, вследствие которого повторяемость положительных аномалий по выборке 2012–2017 гг. более чем вдвое превышала повторяемость градации «ниже нормы».

Гистограммы относительных частот прогнозов в заданном интервале вероятностей показывают, что градации «ниже нормы» и «норма», в отличие от градации «выше нормы», прогнозировались с большой вероятностью крайне редко. Повторяемость прогнозов, в которых с большой вероятностью прогнозировалась градация «выше нормы», была относительно высокой, что вполне соответствует наблюдаемой тенденции изменения климата.

### Заключение

В заключение отметим, что изложенная технология позволяет расширить спектр прогностической продукции традиционного месячного прогноза. Увеличение заблаговременности месячных прогнозов до двух недель, временная и пространственная детализация, прогнозирование в терминах вероятностей, а также режим еженедельного выпуска прогнозов – все это должно способствовать более активному использованию прогностической информации, которая, несмотря на высокую степень неопределенности, существенно дополняет и по ряду позиций уточняет климатические данные.

В соответствии с решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета прогнозы, выпускаемые в ГГО по рассмотренной технологии, рекомендованы к использованию в информационном обеспечении СЕАКЦ.

Следует отметить, что перспективы улучшения долгосрочных прогнозов далеко не исчерпаны. Главными направлениями на этом пути остаются совершенствование гидродинамических моделей атмосферы, океана, и климатической системы, а также увеличение полноты и точности вводимых начальных данных. Ввиду сложности этих задач быстрых успехов здесь ожидать не следует. Другой важной задачей остается адекватная оценка неопределенности конкретных прогнозов, учитывающая комплекс факторов: ошибки начальных данных, граничных условий, а также ошибки моделей, в частности ошибки параметризации подсеточных физических процессов. Эта задача должна решаться на основе использования мультимодельных ансамблей – ансамблей прогнозов нескольких качественных моделей, использующих различные схемы параметризации.

В целях создания мультимодельной прогностической системы на основе двух независимых моделей атмосферы: Т63L25 (ФГБУ «ГГО») и модели ПЛАВ (ФГБУ «Гидрометцентр России») [14] были проведены годичные совместные испытания детализированных прогнозов на срок до 45 суток с недельной дискретностью выпуска по согласованной программе. По полученным результатам в большинстве случаев и в среднем прогнозы ГГО имели более высокие оценки успешности, особенно в части прогнозов приземной температуры воздуха. Несмотря на это в ряде случаев комплексирование прогнозов ГГО и ГМЦ было весьма полезным. В среднем комплексные прогнозы характеризуются более устойчивыми во времени показателями успешности и также рекомендованы к использованию в информационном обеспечении СЕАКЦ.

*Поступила в редакцию 21.09.2017 г.*

## Список использованных источников

1. Багров А.Н., Локтионова Е.А. Новая технология подготовки исходной информации для долгосрочного прогноза погоды // *Метеорология и гидрология*. 1994. № 11. С. 100-109.
2. Вильфанд Р.М., Мартазинова В.Ф., Цепелев В.Ю., Хан В.М., Мироничева Н.П., Елисеев Г.В., Иванова Е.К., Тищенко В.А., Уткузова Д.Н. Комплексирование синоптико-статистических и гидродинамических прогнозов температуры воздуха на месяц // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 8. С. 5-17.
3. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Мирвис В.М., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Львова Т.Ю. Совместные испытания технологий глобального сезонного прогноза на основе моделей Гидрометцентра России и ГГО // *Информационный сборник № 38. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2011. С. 4-13.
4. Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.В., Павлова Т. В., Говоркова В. А., Школьник И. М., Байдин А. В. Модель общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-03 T63L25) // *Труды ГГО*. 2014. Вып. 571. С. 5-87.
5. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. РД 52.27.284-91. М.: Комитет гидрометеорологии при кабинете министров СССР, 1991. 150 с.
6. Мецкерская А.В., Мирвис В.М., Голод М.П. Оценки успешности оперативных прогнозов, составленных методом многофакторной регрессионной средней и гидродинамико-статистическим методом для основной зернопроизводящей зоны СНГ и территории России. // *Проблемы и достижения долгосрочного метеорологического прогнозирования: Труды научного семинара Национальной академии наук Украины и российского фонда фундаментальных исследований 5-7 октября 2011, Киев, Украина*. Киев: Ника-Центр, 2012. С. 24-39.
7. Мирвис В.М. Оценка и коррекция систематических ошибок гидродинамического прогноза приземной температуры воздуха на месяц для сети станций СНГ // *Труды ГГО*. 2001. Вып. 550. С. 155-165.
8. Мирвис В.М., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Новая технология ансамблевого гидродинамического прогноза на 45 суток и региональные оценки успешности прогнозов для Северной Евразии // *Труды ГГО*. 2014. Вып. 570. С. 5-33.
9. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгие В.А., Львова Т.Ю. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 2. С. 5-16.
10. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Опыт калибровки вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха, полученных на основе ансамблевых расчетов по гидродинамической модели атмосферы ГГО // *Труды ГГО*. 2012. Вып. 566. С. 1-19.
11. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А., Байдин А. В. Прогностические эксперименты на основе совместной модели океан - атмосфера ГГО // *Труды ГГО*. 2016. Вып. 583. С. 129-148.
12. Муравьев А.В. Стандартизованная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов. (SVS LRF) // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, Лтд, 2010. С.264-288.
13. Пичугин Ю.А., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Гаврилина В.М. Гидродинамические долгосрочные прогнозы погоды по ансамблю начальных состояний // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 2. С. 5-15.
14. Толстых М.А. Глобальная полуглаванжева модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ОАО ФОП, 2010. 111 с.
15. Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.А., Павлова Т.В., Вавулин С.В., Школьник И.М., Зубов В.А., Гаврилина В.М., Говоркова В.А.. Современная версия глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-2) // *Труды ГГО*. 2001. Вып. 550. С. 3-43.

16. Jolliffe I., Stephenson D. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. Wiley and Sons Ltd, 2003. 240 p.
17. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2002. Vol. 83. P. 1631-1643.
18. Min Y.M., Kryjov V.N., Oh, S.M., Lee H.J. Skill of real-time operational forecasts with the APCC multimodel ensemble prediction system during the period 2008–2015 // Clim. Dyn. 2017. doi:10.1007/s00382-017-3576-2.
19. Razuvaev V.N., Apasova E.G., Martuganov R.A., Steurer P., Vose R. Daily Temperature and Precipitation Data for 223 U.S.S.R. Stations. ORNL/CDIAC, Numerical data package – 040. Oak Ridge National laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1993. 47 p. plus two appendices.
20. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate // J. Climate. 2002. Vol. 15. P. 1609-1625.
21. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF) // New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485), 2002. Vol. 1.
22. Taylor K.E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 7183-7192.
23. Vitart F., Robertson A.W., David L.T., Anderson D.L.T. Subseasonal to Seasonal Prediction Project: bridging the gap between weather and climate // Bulletin WMO. 2012. Vol. 61(2).

## SUMMARIES

**Five years experience of operational forecasting meteorological conditions for up to 45 days based on the atmosphere general circulation model of the MGO (version MGO-3 T63L25)** / Mirvis V.M., Meleshko V.P., Lvova T.Yu., Matyugin V.A. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 29-50.

The article analyzes in detail the long time experience of the MGO in forecasting the average weekly and monthly meteorological conditions on the basis of the AGCM T63L25 for up to 45 days. The technology of weekly release of forecasts for two month periods (daily and with two weeks lead time) with detalization by weeks for the first month is described The forecast package contains anomalies in the continuous scale and probabilities of 3 categories on the global grid for the five main meteorological elements, as well as forecasts of surface air temperature and precipitation for 70 stations in the North-Eurasian region. Global and regional skills scores of forecast quality are considered.

*Keywords:* detailed monthly meteorological forecast, atmospheric general circulation model, probabilistic forecast, global and regional forecast skill scores.

УДК 551.509

## БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД К ВЕРОЯТНОСТНОМУ ПРОГНОЗУ ЗИМНЕЙ ФАЗЫ АРКТИЧЕСКОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ

***В.Н. Крыжов***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва  
kryjov@metcom.ru*

В статье рассматривается метод сезонного прогноза зимней фазы Арктической осцилляции (АО). Прогноз формулируется в терминах вероятности попадания среднего зимнего (декабрь-февраль) индекса АО в одну из трех вероятных категорий: ниже нормы, около нормы, выше нормы. В качестве предиктора используется аномалия октябрьской циркуляции  $H_{500}$  над Таймыром. Алгоритм расчета строится на основе теоремы Байеса. Оценка прогноза проводится на кросс-валидированных рядах с использованием показателя мастерства вероятностных прогнозов осуществления событий в ранжированных категориях. Проведенный анализ показал успешность метода. Превышение мастерства методического прогноза над климатическим прогнозом значимо на 0,5% уровне в одностороннем тесте.

*Ключевые слова:* Арктическая осцилляция, вероятностный сезонный прогноз, теорема Байеса.

### Введение

Арктическая осцилляция (АО) – это доминантная мода изменчивости зимней циркуляции над внетропическими широтами северного полушария [26, 27]. Положительная фаза АО ассоциируется с преобладанием зональной циркуляции в средних широтах, отрицательная – меридиональной. Во многих работах показано синхронное влияние зимней фазы АО на температуру Северной Евразии, причем для температуры Европейской части и Восточной Сибири корреляции превышают 0,6–0,7 [5]. Влияние зимней фазы АО на температуру Северной Евразии не ограничивается синхронными связями, в северных районах оно прослеживается до окончания таяния снега и льда [17]. Статистически значимо здесь и влияние зимней фазы АО на среднюю годовую температуру [3, 18]. Причем на фоне положительной корреляции зимнего индекса АО и средней годовой температуры на севере Европы корреляция между зимним индексом АО и ноябрьской температурой Восточной Европы отрицательна [4]. Это определяется передачей сигнала через ноябрьское всплытие зимней аномалии температуры воды в Северной Атлантике и соответствующую ноябрьскую аномалию циркуляции [10].

Оперативные модельные прогнозы зимней фазы АО с месячной заблаговременностью пока недостаточно надежны. По опубликованным оценкам, для тридцатилетних рядов только модель GloSea5 (UKMO) и модель Пусанского государственного университета (Южная Корея) прогнозируют зимний индекс АО с корреляцией, превышающей 0,5 [8, 16, 21, 24, 25]. В СЕАКЦ эти прогнозы не поступают.

Статистический прогноз зимней фазы АО на основе октябрьской аномалии снежного покрова в Восточной Сибири был предложен в [11, 12] и внедрен в оперативную практику. Со временем связи ослабели и в [13] был предложен новый предиктор – скорость роста октябрьской аномалии снежного покрова. Однако, как показано в работе [23], связи зимнего индекса АО и обоих предикторов оказались нестабильны.

В [19] были установлены связи зимнего индекса АО и аномалии высоты геопотенциала в средней тропосфере над полуостровом Таймыр и морем Лаптевых – Таймырской циркуляционной аномалией (ТЦА), причем аномалия скорости роста октябрьской аномалии снежного покрова – это одно из следствий аномалии ТЦА [9]. В [20] связь зимней фазы АО с октябрьской полярностью ТЦА была подтверждена в режиме детерминистского прогноза, имитирующего прогнозы в реальном времени. Так как целью настоящей статьи является представление метода вероятностного прогноза, а не выбор предиктора, достаточно обоснованный в опубликованных уже статьях [19, 20], представленный прогноз строится на этом же предикторе – аномалии высоты  $H_{500}$  над областью, ограниченной  $70\text{--}80^\circ$  с. ш. и  $100\text{--}120^\circ$  в. д. Конечно, представленный прогноз, несмотря на изменение стратегии верификации, не может считаться полностью независимым, так как предиктор был выбран по результатам предыдущих исследований.

### Данные и метод прогноза и верификации

В работе использовался индекс АО, публикуемый на сайте Центра прогноза климата (Climate Prediction Center). Поля  $H_{500}$  взяты из Реанализа I NCEP/NCAR [15]. Период анализа – 1979–2012 гг. (34 года).

Расчетный метод вероятностного прогноза зимнего индекса АО строился на теореме Байеса. Формулировку и варианты применения теоремы можно найти практически в любом учебнике по теории вероятностей, например в [7]:

$$P(y_i | x) = \frac{P(y_i)P(x | y_i)}{\sum_{i=1}^M P(y_i)P(x | y_i)}, \quad (1)$$

где  $P(y_i | x)$  – апостериорная вероятность события  $y_i$  при условии события  $x$ ;  $P(y_i)$  – априорная вероятность события  $y_i$ ;  $P(x | y_i)$  – функция правдоподобия; в знаменателе – полная вероятность события  $x$ . В нашей модели событие  $y_i$  – реализация зимнего индекса АО в одной из  $M$  ( $M = 3$ )

равновероятных категорий – выше нормы, около нормы, ниже нормы; событие  $x$  – наблюдаемая октябрьская ТЦА в терминах таких же трех равновероятных категорий;  $P(x|y_i)$  – повторяемость наблюдаемой категории октябрьской ТЦА при том или ином событии  $y_i$ , т. е. при попадании зимнего индекса АО в одну из трех перечисленных выше категорий.

С учетом нормального распределения и индекса АО и ТЦА, границы их категорий определялись как  $\pm 0,43$  стандартного отклонения индекса АО и величины ТЦА соответственно.

Верификационные оценки рассчитывались на рядах кросс-валидированных прогнозов с пропуском трех лет – года прогноза и двух последующих лет. Этот пропуск устраняет влияние последующих за годом прогноза лет на расчет функции правдоподобия, так как радиус корреляции для обоих индексов на превышает двух лет.

Для оценки прогнозов применялся наиболее часто используемый в научной литературе показатель мастерства вероятностных прогнозов осуществления событий в ранжированных категориях (Rank Probability Skill Score – *RPSS*). Следуя [1], далее будем применять более краткое название – показатель мастерства вероятностных прогнозов ранжированных категорий.

*RPSS* характеризует мастерство оцениваемых прогнозов по сравнению с референтными прогнозами, в данном случае климатическими. При оценке успешности прогнозов по их множеству используется агрегированное значение *RPSS*, рассчитываемое как

$$RPSS = 1 - \frac{\overline{RPS}}{\overline{RPS}_{cl}}, \quad (2)$$

где *RPS* – оценка вероятностных прогнозов ранжированных категорий. Черта сверху означает осреднение по всем прогнозам. *RPS* определяется как [6, 14, 22]

$$RPS = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \left[ \left( \sum_{k=1}^m p_k \right) - \left( \sum_{k=1}^m o_k \right) \right]^2, \quad (3)$$

где  $M = 3$  – число категорий;  $p$  – прогнозируемая вероятность;  $o = 1$ , если событие произошло, и  $o = 0$  в противном случае. Для  $\overline{RPS}_{cl}$  климатического прогноза для трех равновероятных категорий  $p = 1/3$ . Черта сверху означает осреднение по времени и, для обобщенных значений, по пространству. *RPS* характеризует ошибку прогноза, поэтому для идеальных прогнозов  $RPS = 0$ , а с возрастанием ошибки значения *RPS* увеличиваются, при этом наихудшее возможное значение равно  $M - 1$ . Стоит также отметить, что хорошо известный и также часто используемый показатель Брайера можно рассматривать как частный случай *RPS*, когда число категорий равно двум.

*RPSS* изменяется в диапазоне от минус бесконечности до единицы. *RPSS* идеальных прогнозов равен единице. Положительные значения *RPSS*

говорят о превосходстве тестируемого метода, отрицательные – о превосходстве климатического прогноза.

Для оценки статистической значимости полученных оценок применялся метод Монте – Карло в версии, предложенной в [2]. Случайным образом генерировались 32-летние последовательности вероятностей, дающих единицу в сумме по трем градациям. По этим последовательностям рассчитывались случайные значения *RPSS*. Было генерировано 1000 последовательностей и было получено, соответственно, 1000 случайных значений *RPSS*. Уровень значимости (односторонний) определялся как доля случайно полученных значений *RPSS*, превышающих или равных значению *RPSS*, полученному на оригинальных прогнозах. Например, одностороннему уровню значимости 2,5 % соответствует 25 превышений в 1000 тестов.

### Результаты

Значение *RPSS* вероятностного прогноза зимнего индекса АО по октябрьскому циркуляционному индексу, агрегированное по 34 прогнозам, равно 0,15. Это значение статистически значимо на уровне 0,5 % в одностороннем тесте с использованием метода Монте – Карло.

На рисунке представлена дихотомная интерпретация этого вероятностного прогноза на основе прогнозируемых наиболее вероятных категорий зимнего значения АО. Такая интерпретация предполагает, что прогнозируется фаза зимнего индекса АО, соответствующая категории наибольшей прогностической вероятности. Прогноз считается оправдавшимся, если зимой наблюдается эта же фаза АО. Если наблюдается любая другая фаза, даже соответствующая соседней категории, прогноз считается неоправдавшимся. При дихотомном подходе к оценке прогноза, случайный прогноз оказался бы успешным в 1/3 случаев из 34, то есть в 11,33 случаях, при округлении сверху – в 12 случаях. В нашем тесте правильный прогноз был в 19 случаях из 34 (в оценке по биномиальному распределению отличие 19 от 12 значимо на 5 %).

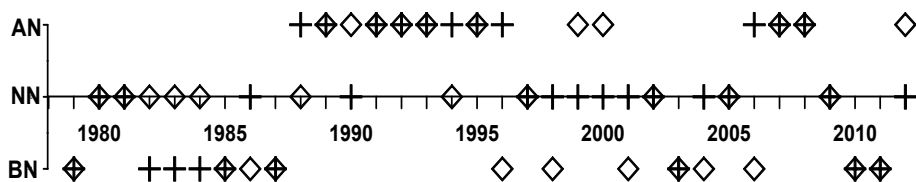


**Рис.** Наблюдаемые категории зимнего индекса АО (ромб) и прогнозируемые с использованием теоремы Байеса наиболее вероятные категории зимнего индекса АО (крест). Годы отмечены по январю.

### Заключение

Представленный в статье метод вероятностного прогноза, основанный на теореме Байеса, показал свою эффективность. Вероятностный прогноз зимней фазы АО по октябрьскому индексу ТСА весьма успешен:  $RPSS = 0,15$ , это значение статистически значимо на 0,5%-ном уровне. В отличие от обычных методов долгосрочного прогнозирования на основе теоремы Байеса, в которых используется функция правдоподобия в виде регрессии, в представленном методе применена функция правдоподобия, построенная на частотности соотношений предиктора и предиктанта. Этот подход не подразумевает необходимости линейной их связи, что открывает более широкие возможности применения метода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №14-37-00053П) в Гидрометцентре России.

*Поступила в редакцию 25.10.2017 г.*

### Список использованных источников

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Семенюк Е.А., Бардин М.Ю., Муравьев А.В., Нестерова Г.А., Савелова О.Ф., Хамидулина А.Б. Схема вероятностного адаптивного метеорологического прогноза (групповые аналогии) с оптимизацией состава предикторов // Труды Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 306. С. 3-55.
2. Киктев Д.Б., Крыжов В.Н. О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С. 27-38.
3. Крыжов В.Н. Связь средней годовой температуры воздуха в Северо-Западной Евразии с арктическим колебанием // Метеорология и гидрология. 2004. № 1. С. 5-14.
4. Крыжов В.Н. Причины ноябрьских похолоданий 1980-х - 1990-х годов на Европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2008. № 1. С. 5-14.
5. Крыжов В.Н., Горелиц О.В. Арктическая осцилляция и ее влияние на температуру и осадки Северной Евразии в XX веке // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 5-19.
6. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгин В.А., Львова Т.Ю. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГТО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 5-16.
7. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 320 с.
8. Athanasiadi, P.J., Bellucci, A., Scaife A.A., Hermanson L., Materia S., Sanna A., Borrelli A., MacLachlan C., Gualdi S. A multisystem view of wintertime NAO seasonal predictions // J. Clim. 2017. Vol. 30(4). P. 1461-1475.
9. Bednorz E., Wibig J. Circulation patterns governing October snowfalls in southern Siberia // Theoretical and Applied Climatology. 2017. Vol. 128 (1-2). С. 129-139.
10. Choi Y.-W., Ahn J.-B., Kryjov V.N. November seesaw in northern extratropical sea level pressure and its linkage to the preceding wintertime Arctic Oscillation // Int. J. Clim. 2016. Vol. 36. P. 1375-1386; doi:10.1002/joc.4431.
11. Cohen J, Barlow M, Kushner P, Saito K. Stratosphere-troposphere coupling and links with Eurasian land surface variability // J. Clim. 2007. Vol. 20. P. 5335-5343.
12. Cohen J, Fletcher C. Improved skill of Northern Hemisphere winter surface temperature prediction based on land-atmosphere fall anomalies // J. Clim. 2007. Vol. 20. P. 4118-4132.
13. Cohen J, Jones J. A new index for more accurate winter predictions // Geophys. Res. Lett. 2011. Vol. 38. L21701.

14. *Epstein E.S.* A scoring system for probability forecasts of ranked categories // *J. Appl. Meteorol.* 1969. Vol. 8. P. 985-987.
15. *Kalnay E. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 1996. Vol. 77. P. 437-471.
16. *Kim H.J., Ahn J.B.* Improvement in prediction of the Arctic Oscillation with a realistic ocean initial condition in a CGCM // *J. Clim.* 2015. Vol. 28. P. 8951-8967.
17. *Kryjov V.N.* The influence of the winter Arctic Oscillation on the Northern Russia spring temperature // *Int. J. Clim.* 2002. Vol. 22. P. 779-785.
18. *Kryjov V.N.* Searching for circulation patterns affecting Northern Europe annual temperature // *Atm. Sci. Lett.* 2004. Vol. 5. P. 23-34.
19. *Kryjov V.N.* October circulation precursors of the wintertime Arctic Oscillation // *Int. J. Clim.* 2015. Vol. 35. P. 161-171; doi: 10.1002/joc.3968.
20. *Kryjov V.N., Min Y.-M.* Predictability of the wintertime Arctic Oscillation based on autumn circulation // *Int. J. Clim.* 2016. Vol. 36. P. 4181-4186; doi: 10.1002/joc.4616.
21. *MacLachlan C, Arribas A, Peterson KA, Maidens A, Fereday D, Scaife AA, Gordon M, Vellinga M, Williams A, Comer RE, Camp J, Xavier P, Madec G.* Global seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 141. P. 1072-1084.
22. *Murphy A.H.* A note on the ranked probability score // *J. App. Meteorol.* 1971. Vol. 10. P. 155-156.
23. *Peings Y., Brun E., Mauvais V., Douville H.* How stationary is the relationship between Siberian snow and Arctic Oscillation over the 20th century? // *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. P. 183-188.
24. *Scaife A.A. et al.* Skillful longrange prediction of European and North American winters // *Geoph. Res. Lett.* 2014. Vol. 41. P. 2514-2519; doi:10.1002/2014GL059637.
25. *Sun J., Ahn J.B.* Dynamical seasonal predictability of the Arctic oscillation using a CGCM // *Int. J. Clim.* 2015. Vol. 35. P. 1342-1353; doi:10.1002/joc.4060.
26. *Thompson D.W.J., Wallace J.M.* The Arctic oscillation signature in wintertime geopotential height and temperature fields // *Geoph. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. P. 1297-1300.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M.* Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month to month variability // *J. Climate.* 2000. Vol. 13. P. 1000-1016.

## SUMMARIES

**Probabilistic Prediction of the Wintertime Arctic Oscillation Phase Based on the Bayes Theorem** / Kryjov V.N. // *Proceedings of Hydrometcentre of Russia.* 2017. Vol. 366. P. 51-56.

A method of seasonal prediction of the wintertime Arctic Oscillation (AO) phase is discussed. The forecast is formulated in terms of tercile probabilities of the wintertime (December-February) mean AO index, below norm, near norm, above norm. The October Z500 circulation anomaly over the Taymyr Peninsula is used as a predictor. Computational algorithm is based on the Bayes Theorem. Verification is performed on the cross-validated forecasts using the rank probability skill score. The analysis yields the skill of the method. The analysed method outperforms climatological forecasts, with superiority being significant at the 0.5% level in one-tailed test.

*Keywords:* Arctic Oscillation, probabilistic seasonal forecast, Bayes Theorem.

УДК 551.5

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПУСКА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЙ О НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ В РАМКАХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕВЕРО-ЕВРАЗИЙСКОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА (СЕАКЦ)**

***Е.С. Ганиева, В.М. Хан,  
И.А. Куликова, Е.Н. Круглова***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва  
ringanieva@gmail.com*

В статье обсуждается экспериментальная технология выпуска в Северо-Евразийском климатическом центре предупреждений о неблагоприятных метеорологических явлениях. Вычислительным ядром системы предупреждений является глобальная полулагранжева модель общей циркуляции атмосферы ФГБУ «Гидрометцентр России» и Института вычислительной математики РАН. Цель выпуска предупреждений – своевременное информирование Национальных метеорологических и гидрологических служб СНГ о фактическом состоянии, эволюции и прогнозе значительных аномалий температуры воздуха и осадков на внутрисезонных масштабах времени с недельной дискретизацией по территории Северной Евразии.

*Ключевые слова:* климатические предупреждения, неблагоприятные метеорологические явления, долгосрочные прогнозы погоды, аномалия температуры воздуха и осадков, модель ПЛАВ, Северо-Евразийский климатический центр.

### **Введение**

В последние десятилетия экономические потери, связанные с климатической изменчивостью и экстремальными явлениями погоды, резко увеличились. В «Дорожной карте по снижению рисков» Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) подчеркивается, что стихийные бедствия гидрометеорологического характера наносят большой экономический ущерб и представляют наибольшую опасность для жизни и здоровья людей [17]. По оценкам экспертов (ссылки IPCC и др.), по мере дальнейшего повышения глобальных температур, вследствие потепления климата, численность и сила экстремальных явлений может возрасти.

Статистика общего числа гидрометеорологических опасных явлений (ОЯ) на территории России подтверждает глобальную тенденцию их роста в течение последних десятилетий [10]. Как правило, случаи с экстремальными проявлениями метеорологических параметров обусловлены длительными макромасштабными нарушениями (блокированием) зонального

переноса [1]. Одним из масштабных проявлений погодных и климатических изменений стала экстремально жаркая и сухая погода, отмечавшаяся на Европейской территории России (ЕТР) летом 2010 года. Причиной сложившихся неблагоприятных погодных условий стало наличие блокирующего антициклона экстремальной продолжительности и интенсивности, установившегося над центральными районами и Поволжьем в 3-й декаде июня и продержавшегося до середины августа (в общей сложности 55 дней). На фоне экстремальной жары возникли торфяные и лесные пожары [15], пострадали сельскохозяйственные угодья, ухудшилась экологическая обстановка, что тяжело отразилось на здоровье людей. Экономический ущерб только от лесных пожаров превысил 300 млрд рублей [5].

Другим примером масштабного экстремального явления стало наводнение в Приамурье в 2013 году, охватившее огромную территорию российского Дальнего Востока и северо-восточных районов Китая. Более одного месяца над Амуром и его притоками преобладали циклонические формы атмосферной циркуляции [9]. Наличие блокирующего антициклона на северо-западе Тихого океана в совокупности с усилением циркуляции летнего дальневосточного муссона способствовало активизации беспрецедентной по своей продолжительности и интенсивности циклонической серии над югом Дальнего Востока [3]. Многодневные непрекращающиеся ливневые дожди явились главной причиной наводнения на Дальнем Востоке в 2013 году. Десятки населенных пунктов, дороги, сельскохозяйственные угодья были затоплены, парализована хозяйственная и производственная деятельность, нанесен значительный ущерб экономике региона.

Подобные проявления экстремальных метеорологических и гидрологических явлений определяют необходимость в исследованиях физических причин их формирования и особенностей пространственно-временной изменчивости. Наиболее актуальными являются задачи качественного оперативного мониторинга и прогнозирования экстремальных метеорологических явлений в различных масштабах времени [12].

В данной статье дается описание экспериментальной квазиоперативной технологии выпуска предупреждений (Climate Watch Advisory) о значительных длительных аномалиях температуры воздуха и осадков на внутрисезонных интервалах времени с недельной дискретизацией в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ). Технология реализована на базе модели ПЛАВ ФГБУ «Гидрометцентр России» и Института вычислительной математики РАН [13].

## **1. Определение неблагоприятных метеорологических явлений**

Согласно Наставления [6], выпущенного Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, к неблагоприятным метеорологическим явлениям (НМЯ) относятся метеорологические явления, которые по своим характеристикам (интенсивности, продолжительности) не достигают критериев ОЯ, но значительно затрудняют

деятельность отдельных отраслей экономики. В оперативной практике краткосрочных прогнозов погоды передача метеорологической информации о фактическом НМЯ производится по «достижении или превышении установленных критических значений интенсивности» данного явления.

В зарубежной оперативной практике метеорологического прогнозирования наиболее близким к НМЯ понятием является термин «High Impact Weather Event» (HIWE), который обычно характеризует метеорологические условия, оказывающие дестабилизирующее влияние на состояние безопасности в экономической и социальной сферах жизни общества [24]. В Стратегическом плане ВМО на 2009–2017 гг. [25] дается более развернутое определение понятия HIWE. При этом подчеркивается важность количественной оценки воздействий гидрометеорологических условий, событий или последовательности событий на общество, выражаемой в людских потерях, травмах, экономическом ущербе или в предельных значениях других физических величин.

В определении ВМО временной масштаб НМЯ не ограничивается краткосрочным действием, а распространяется и на более длительные интервалы времени. Так, под аномально жаркой (холодной) погодой понимается сохранение над данной территорией в течение 5 суток и более значений среднесуточной температуры воздуха выше (ниже) климатической нормы на  $7^{\circ}\text{C}$  и более [7]. В отличие от практики краткосрочных прогнозов, в практике долгосрочных прогнозов классификаторы для определения НМЯ на сегодняшний день отсутствуют. Для каждого региона характерны свои климатические особенности, вследствие чего критерии для НМЯ определяются специалистами Национальных метеорологических и гидрологических служб (НМГС) на основе климатических и статистических данных о НМЯ, характерных для данной местности. Эта неопределенность является одним из актуальных вопросов для обсуждения, а также исследования возможности реализации общих подходов, учитывающих региональные климатические особенности.

В процессе оперативной практики выпуска предупреждений о НМЯ в СЕАКЦ были установлены следующие основные критерии. Температурный режим считается неблагоприятным, если в течение двух недель в пределах данной территории сохраняются аномалии температуры воздуха порядка  $6\text{--}7^{\circ}\text{C}$  и более. Для осадков в качестве дополнительного параметра привлекается стандартизованный индекс осадков SPI, подробно описанный в литературе [2, 11, 14, 22]. При значениях индекса  $\text{SPI} \leq -1,50$  на интервалах времени порядка одного месяца речь может идти о метеорологической засухе,  $\text{SPI} \geq 1,50$  – об избыточном увлажнении.

## 2. Климатическое обслуживание

Основной функцией климатического обслуживания является распространение климатической информации среди населения или специальных пользователей. Оно предполагает тесное партнерство между НМГС и заинтересованными участниками, включая правительственные учреждения,

частный сектор и научные круги, с целью интерпретации и применения информации о климате прошлого для принятия решений, устойчивого развития, а также для улучшения климатической информационной продукции, предсказаний и ориентировочных прогнозов [4]. В качестве фундаментальных принципов предоставления климатического обслуживания обозначены:

- знание пользователя и понимание, что ему нужно;
- своевременность и доступность информации;
- обеспечение качества предоставляемой продукции, подготовленной в комплекте с надлежащей документацией.

За последние годы рамки климатического обслуживания значительно расширились. Помимо информации о состоянии цикла явления Эль-Ниньо-Южное Колебание (ЭНЮК) [19, 20, 23, 26], влияние которого проявляется в крупномасштабных аномалиях температуры воздуха и осадков во многих регионах земного шара, развитые страны стали улучшать оперативную деятельность в режиме реального времени для мониторинга и оценки климатического состояния, а также распространения информации, ориентированной на различные экстремальные явления (жара, холод, засуха или наводнение).

Выпуск климатических предупреждений (КП) (Climate Watch) об экстремальных явлениях стало важным шагом на пути развития климатического обслуживания. В отличие от климатического мониторинга (Climate Monitoring), КП имеют целью предоставить конечному пользователю необходимый объем информации, позволяющей принять соответствующие меры по минимизации последствий, связанных с климатическими аномалиями. Синтезируя большой объем информации, полученной в результате не только мониторинга, но и прогноза основных метеорологических величин, КП могут служить основой для принятия критически важных социально-экономических решений [21]. В 2004 году при ВМО была создана Экспертная группа по разработке Наставления о климатических предупреждениях (Climate Watch) в рамках открытой группы Комиссии по климатологии для мониторинга и анализа изменчивости и изменения климата [21]. В 2005 году Экспертная группа выпустила Наставление о климатических предупреждениях и их основных составных элементах [21].

Несмотря на имеющиеся в различных НМГС отличия, в общем виде система КП включает:

- текущую деятельность по мониторингу климата;
- экспертную оценку региональных климатических аномалий в контексте глобального изменения климата;
- среднесрочное и долгосрочное прогнозирование или использование общедоступных среднесрочных и долгосрочных прогнозов мировых метеорологических центров;
- взаимодействие с потребителями с целью выработки необходимых показателей и критериев экстремальности метеорологических величин;
- разработку способов представления выходной продукции;

– процедуру оценки эффективности системы КП.

Краеугольным камнем системы КП является взаимодействие с пользователем, в процессе которого реализуется конечная цель такого рода деятельности, направленная на снижение рисков и смягчение негативных последствий, связанных с экстремальными явлениями.

### **3. Оперативная деятельность по выпуску предупреждений о НМЯ**

Наставление о климатических предупреждениях ВМО является ключевым источником для ведения оперативной деятельности, связанной с мониторингом и прогнозом НМЯ. Региональные климатические центры (РКЦ) и РКЦ-сеть, которые являются частью инфраструктуры Информационной Системы Климатического Обслуживания Всемирной метеорологической организации, возложили на себя обязательства по мониторингу и прогнозу климатических аномалий, в том числе экстремальных. Концепция РКЦ успешно развивается по всему миру и приносит практическую пользу национальным метеослужбам и другим заинтересованным пользователям. В середине 2013 года Исполнительный совет ВМО официально присвоил статус РКЦ-сеть в регионе PA-VI (Европа) роль оперативного подразделения по климатическому обслуживанию в Европе. После этого были определены функции для каждого узла сети РКЦ [18]:

- Узел по климатическим данным (RCC Node-CD), управляемый Королевским метеорологическим институтом Нидерландов (Нидерланды);
- Узел по климатическому мониторингу (RCC Node-CM) под руководством Немецкой метеорологической службы Deutscher Wetterdienst (DWD), Германия;
- Узел по долгосрочному прогнозированию, совместно управляемый Метео-Франс (Франция) и Росгидромет (Россия).

Одной из ключевых функций Немецкого центра DWD в области климатического мониторинга является предоставление консультативной информации для Национальных метеорологических и гидрологических служб о вероятных НМЯ в форме бюллетеня-предупреждения для региона PA-VI. Выпуск предупреждений включает несколько основных этапов:

- распространение консультативного предварительного предупреждения (Climate Watch Advisory) о предстоящем НМЯ среди всех членов европейской сети РКЦ по региону PA-VI;
- экспертную оцениванку специалистами НГМС собственных результатов мониторинга и прогнозов основных метеорологических величин с учетом региональных климатических особенностей;
- передача полученных специалистами НГМС оценок о вероятной динамике развития и распространении НМЯ в центр DWD;
- выпуск специалистами DWD официального предупреждения о НМЯ с последующим распространением данной информации среди Национальных метеорологических и гидрологических служб.

Выпуск предупреждений о НМЯ позволяет своевременно уведомить и проинформировать НГМС о возможных НМЯ и подготовить их к

последующему этапу мониторинга и оценки состояния климатической системы, анализу доступных среднесрочных и долгосрочных прогнозов метеорологических величин [18]. Кроме того, НМГС имеют возможность на основе данного предупреждения своевременно проинформировать пользователей социально-экономических секторов о наиболее вероятных сценариях неблагоприятного развития событий.

На рис. 1 представлен пример предупреждения об ожидаемой волне тепла над территорией восточного Средиземноморья Немецкого центра DWD в период с 10 по 17 июля 2017 года. В качестве дополнительной информации, помимо текста с предупреждением, в бюллетене размещаются спутниковые снимки, а также карты пространственного распределения геопотенциала изобарической поверхности АТ-500 гПа над территорией региона РА-VI, позволяющие специалистам дать оценку исходной синоптической ситуации. На основе данных текущего мониторинга приземной температуры воздуха Национального центра прогнозов климата (Climate Prediction Centre, USA) за прошедшие 5 недель, а также данных о максимальной температуре воздуха определяется продолжительность и интенсивность НМЯ. Предупреждения выпускаются регулярно по мере поступления информации.

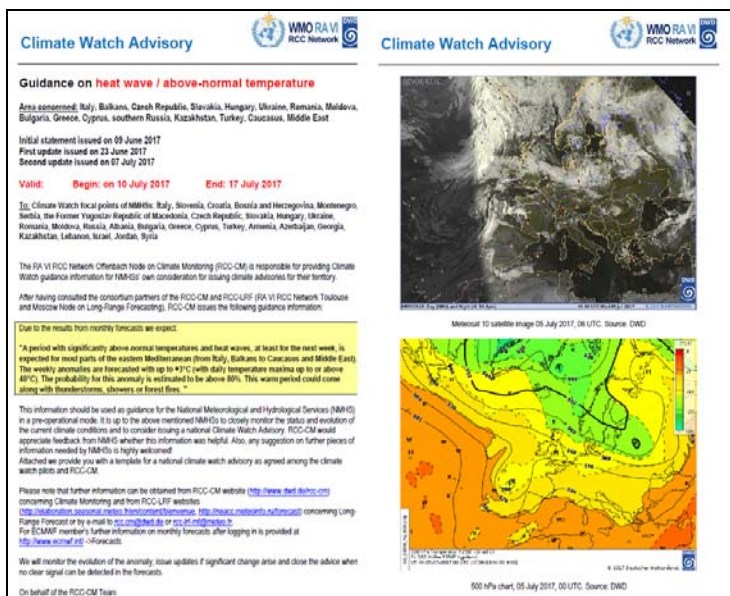


Рис. 1. Предупреждение об аномально жаркой погоде от Немецкого центра DWD.

Другим примером Регионального климатического центра ВМО является Токийский климатический центр в регионе РА-II (Азия), координируемый Японским метеорологическим агентством. На их странице (Tokyo Climate Centre <http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/climate/sokuho.html>)

размещаются еженедельные, ежемесячные и сезонные отчеты о мониторинге экстремальных климатических явлений с краткими описаниями катастрофических случаев, а также карты текущего распределения температуры и осадков по всему миру (рис. 2).



**Рис. 2.** Пример еженедельного отчета от Токийского климатического центра о глобальных экстремальных климатических явлениях.

Северо-Евразийский региональный климатический центр выполняет функции одного из узлов Региональной климатической сети в регионе РА-VI (Европа) со специализацией в области долгосрочных прогнозов. Начиная с 2017 года в экспериментальном режиме в СЕАКЦ выпускаются предупреждения о НМЯ на территории Северной Евразии. Процесс создания и выпуска предупреждения включает:

- анализ синоптической ситуации на основе карт пространственного распределения геопотенциала изобарической поверхности АТ-500 гПа, карт приземного давления на территории Северной Евразии, осредненных за прошедшие 1–2 недели, с целью определения возможностей появления и развития неблагоприятных сценариев;

- экспертную оценку степени аномальности фактического температурного режима и осадков с использованием данных наблюдений на 236 станциях на территории СНГ о температуре и осадках с недельным (за прошедшие 4 недели) и месячным (за прошедший месяц) осреднением;

- ежедневный анализ данных о температуре и осадках, давлении и геопотенциале на основе среднесрочных прогнозов гидрометеорологических моделей: американской Global Forecast System (GFS), европейской ECMWF Integrated Forecasting System (IFS), немецкой Icosahedral Nonhydrostatic Model (ICON);

- анализ прогнозов на неделю и на месяц на базе моделей Гидрометцентра России и ГГО, выпускаемых в рамках деятельности СЕАКЦ;
- сравнение полученного консультативного предупреждения о НМЯ от Немецкого центра DWD (RCC Node-CM), если такое существует на момент создания предупреждения, с результатами собственного анализа;
- принятие решения о выпуске предупреждения;
- передачу предупреждения специалистам в центр DWD, всем заинтересованным пользователям, размещение информации на сайте СЕАКЦ (<http://seakc.meteoinfo.ru/>);
- продолжение мониторинга текущей синоптической ситуации и прогнозов на неделю после того как предупреждение было выпущено;
- выпуск сообщения об окончании НМЯ.

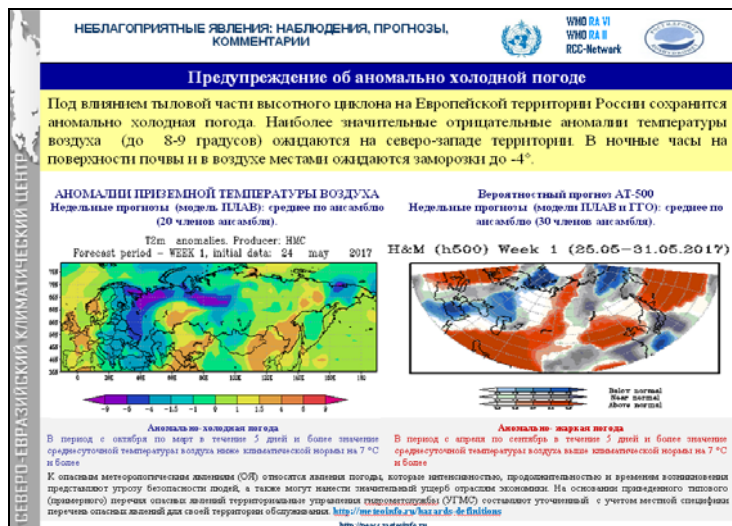
При принятии решений о выпуске предупреждений о НМЯ в СЕАКЦ в качестве основной используется информация мультимодельного прогноза, полученная на основе моделей Гидрометцентра России и ГГО. Предупреждения о НМЯ архивируются с целью проведения в дальнейшем оценок их эффективности.

#### **4. Пример предупреждения о НМЯ**

Ниже приводится конкретный пример предупреждения об аномально холодной погоде, выпущенный СЕАКЦ 24 мая 2017 года. На первой странице (рис. 3 а) размещаются прогностические данные об аномалиях приземной температуры воздуха и геопотенциала изобарической поверхности АТ-500 гПа на неделю, полученные на базе мультимодельного прогноза (30 членов ансамбля) моделей Гидрометцентра России и ГГО. Вторая страница (рис. 3 б) посвящена анализу фактических данных. Карты пространственного распределения осредненной за неделю приземной температуры воздуха строятся с использованием графического пакета GrADS в автоматическом режиме в рамках основной технологической линии прогнозов на неделю и на месяц. В качестве исходной информации используется архив средних суточных значений температуры воздуха ВНИИГМИ-МЦД для 236 станций, расположенных на территории СНГ. Архив регулярно пополняется станционными данными базы МАКТ ФГБУ «Гидрометцентр России».

#### **Заключение**

Задача мониторинга и прогнозирования НМЯ является очень важной как с научной, так и с практической точки зрения. В научном сообществе предприняты многочисленные попытки, направленные на изучение механизмов формирования такого рода явлений и их предсказуемости. Существующая инфраструктура ВМО по информационной системе климатического обслуживания через РКЦ и РКЦ-сеть открывает на регулярной основе дополнительные возможности, позволяющие повысить качество мониторинга и прогнозирования НМЯ.



a)

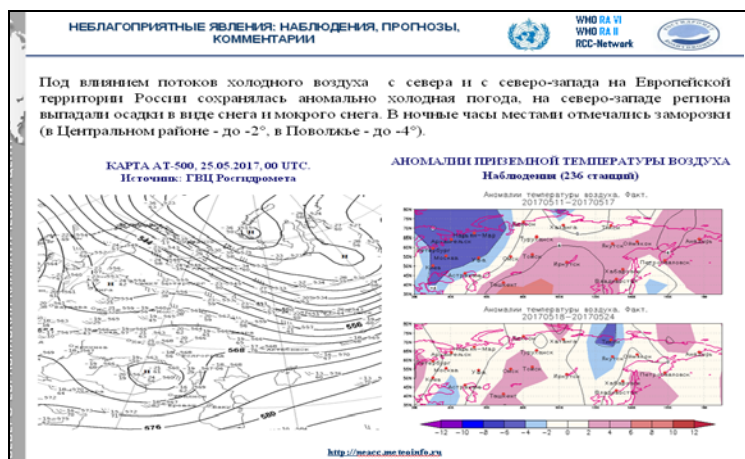


**Рис. 3.** Пример предупреждения об аномально холодной погоде от 24 мая 2017 года, выпущенного СЕАКЦ.

В рамках деятельности СЕАКЦ на протяжении ряда лет проводятся научные исследования по изучению экстремальных метеорологических явлений. Начиная с 2017 года в СЕАКЦ реализована новая экспериментальная квазиоперативная технология по выпуску предупреждений о НМЯ. Своевременное информирование и использование системы предупреждений на практике может позволить конечным пользователям дать оценку рисков возникновения аномальных метеорологических и гидрологических ситуаций и в конечном счете избежать ненужных потерь и затрат, связанных с их негативными последствиями. Полученные результаты могут использоваться при принятии административных решений в сферах энергетики, сельского и водного хозяйств, а также в других отраслях экономики.

Предполагается продолжить работы по усовершенствованию системы предупреждений с целью приближения ее к задачам и запросам потребителей. Все замечания и пожелания по форме и содержанию предупреждений могут быть направлены через веб-сайт СЕАКЦ (<http://seakc.meteoinfo.ru/>).

Авторы выражают благодарность А.М. Кабаку за рекомендации в оформлении статьи, а также Н.А. Никольской и Л.Б. Ананьеву за помощь и поддержку при написании этой статьи.

Часть задач, возложенных на СЕАКЦ по выпуску предупреждений НМЯ, выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-17-00105).

Методика анализа крупномасштабных индексов циркуляции, применяемая при подготовке предупреждений НМЯ, разработана при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-01227).

Поступила в редакцию 20.10.2017 г.

#### Список использованных источников

1. Голубев А.Д., Кабак А.М., Никольская Н.А., Бутова Г.И., Бережная Т.В. Блокирование западного переноса над Евразией зимой 2012 года и связанные с ним погодные аномалии // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 188-213.
2. Куликова И.А., Круглова Е.Н., Киктев Д.Б., Сальников В.Г. Практическая предсказуемость стандартизированного индекса осадков SPI на месячных и сезонных масштабах времени // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 59-74.
3. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16-28.
4. Руководство по климатологической практике. Издание 2014 г. // ВМО-№100. Женева-Швейцария: Всемирная Метеорологическая Организация, 2011.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году: Статистический сборник // под общей редакцией Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2017. 124 с.
6. Руководящий документ. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – М.: Росгидромет, 2009. 62 с.
7. Руководящий документ. РД 52.88.699-2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. М.: Росгидромет, 2008. 30 с.
8. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь в 3-х томах / Под ред. А.И. Бедрицкого. СПб.: Летний сад, 2009.
9. Семенов Е.К., Соколичина Н.Н., Татаринович Е.В., Тудрий К.О. Синоптические условия формирования катастрофического наводнения на Амуре в 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2014. № 8. С. 25-34.
10. Сводное ежегодное сообщение о состоянии и изменении климата на территориях государств-участников СНГ за 2015 год. М.: 2016. <http://sng.pogoda.by/wdpss/?p=799>
11. Страшная А.И., Тищенко В.А., Бережа О.В., Богомолова Н.А. О возможности использования стандартизированного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 357. С. 81-97.
12. Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В. Воспроизведение атмосферной циркуляции на сезонных масштабах новой версией полулагранжевой модели атмосферы // Известия РАН. ФАО. 2010. Т. 46, № 2. С. 149-160.

13. Толстых М.А. Глобальная полу-лагранжева модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ФАО ФОП, 2010. 111 с.
14. Уткузова Д.Н., Хан В.М., Вильфанд Р.М. Статистический анализ эпизодов экстремальной засухливости и увлаженности на территории РФ // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 66-75.
15. Хан В.М. Долгосрочное прогнозирование пожарной опасности лесов на основе ансамблевых сезонных прогнозов по модели ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 5-17.
16. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5-18.
17. A Disaster Risk Reduction Roadmap for the World Meteorological Organization. Final Draft (Version 2.1), 31 March 2017, 27 p.  
<https://www.wmo.int/pages/prog/drr/document/s/DRRRoadmap.pdf>
18. Bissolli P., Cacic I., Mächel H., Röster S. Climate risk early warning systems in Europe. // WMO Bulletin. 2016. Vol. 65(1). Geneva: World Meteorological Organization, 2016.
19. Composite map for El Niño/La Niña events // Tokyo Climate Centre.  
[http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/enso\\_statistics/index.html](http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/enso_statistics/index.html)
20. El Niño and Rainfall // International Research Institute for climate and society.  
[http://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2016/05/ElNino\\_Rainfall.pdf](http://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2016/05/ElNino_Rainfall.pdf)
21. Walter E.B. Guidelines on climate watches // WMO/TD- No. 1269; WCDMP- No. 58. Geneva: World Meteorological Organization, 2005.
22. Lloyd-Hughes B., Saunders M.A. A drought climatology for Europe // Int. J. Clim. 2002. Vol. 22. P. 1571-1592.]
23. Ropelewski C.F., Halpert M.S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Nino/Southern Oscillation. The global climate system. Geneva: WMO, 1987. 87 p.
24. Sills D.M. On the MSC forecasters forum and the future role of the human forecaster // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2009. Vol. 5. P. 620-627.
25. Strategic plan for the implementation of the WMO's World Weather Research Programme (WWRP): 2009-2017 // WMO-TD No. 1505. Geneva, Switzerland, 2009.
26. Van Loon H., Madden R.A. The Southern Oscillation. Part I: Global associations with pressure and temperature in northern winter // Mon. Weather Rev. 1981. Vol.109, No. 6. P. 1150-1162.

## SUMMARIES

**Experimental technology of issuing warnings about adverse climatic events within the framework of the North Eurasia Climate Center activity /** Ganieva E.S., Khan V.M., Kulikova I.A., Kruglova E.N. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 57-67.

The article discusses the experimental technology of Climate watch advisories about adverse meteorological phenomena in the North Eurasia Climate Centre (NEACC). The computational core of the warning system is the semi-Lagrangian atmospheric general circulation model of the Hydrometeorological Centre of Russia and SLAV/Institute of Numerical Mathematics RAS. The purpose of issuing warnings is to timely inform the National Meteorological and Hydrological Services of the CIS (Commonwealth of Independent States) about the current state, evolution and forecast of significant air temperature and precipitation anomalies on the intraseasonal time scales with weekly sampling over the territory of Northern Eurasia.

**Keywords:** climatic warnings, adverse meteorological phenomena, long-term weather forecasts, air temperature and precipitation anomaly, PLAV model, North-Eurasian Climate Center.

УДК 556.06

## ДОЛГОСРОЧНЫЙ АНСАМБЛЕВЫЙ ПРОГНОЗ ВЕСЕННЕГО ПРИТОКА ВОДЫ В ЧЕБОКСАРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРОЧНЫХ И ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ

*С.В. Борщ<sup>1</sup>, А.Н. Гельфан<sup>2</sup>, В.М. Морейдо<sup>2</sup>,  
Ю.Г. Мотовилов<sup>2</sup>, Ю.А. Симонов<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва;*

*<sup>2</sup> Институт водных проблем РАН, г. Москва  
borsch@mecom.ru, hydrowpi@iwp.ru, vsevolod.moreydo@iwp.ru,  
motol49@yandex.ru, simonov@mecom.ru*

Исследуется возможность использования гидрологической модели, созданной на базе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG, для оперативного долгосрочного (с заблаговременностью 3–4 месяца) ансамблевого прогноза незарегулированного притока воды в Чебоксарское водохранилище в период весеннего половодья. Представлены результаты проверочных прогнозов притока воды в водохранилище за 35-летний период (1982–2016 гг.) и показано, что предложенная схема позволила с удовлетворительной точностью спрогнозировать объем и максимальный приток воды в водохранилище, а также число дней с расходами воды выше среднееголетнего максимального значения. В статье представлены результаты оперативного испытания схемы прогноза в период половодья 2017 года. Обсуждаются возможности повышения качества прогноза путем усвоения моделью натурных данных о притоке воды в водохранилище и запасах воды в снежном покрове на дату выпуска прогноза, а также данных метеорологического прогноза.

*Ключевые слова:* долгосрочные гидрологические прогнозы, гидрологическое моделирование, прогноз притока воды к водохранилищам, Чебоксарское водохранилище.

### Введение

Совершенствование методов управления водноресурсными системами для оптимизации водопользования, а также защиты населения и объектов экономики от наводнений в существенной степени зависит от возможностей повышения точности и заблаговременности долгосрочных прогнозов характеристик весеннего притока воды в водохранилища. Реализация указанных возможностей особенно актуальна для водохранилищ Волжско-Камского каскада – одной из крупнейших в мире водноресурсных систем комплексного назначения. Главной задачей каскада является перераспределение во времени крайне неравномерно распределенного

внутри года стока р. Волги, когда в период весеннего половодья, продолжающегося 2–3 месяца, по реке проходит 2/3 годового объема стока.

Осуществление пропуска весеннего половодья через гидроузлы каскада за последние два десятилетия осложнилось в связи с неконтролируемой застройкой нижних бьефов гидроузлов каскада. С другой стороны, фактическое сокращение регулирующей способности каскада водохранилищ из-за ограничений по предполоводной сработке водохранилищ по рыбохозяйственным требованиям ведет к необходимости повышения максимальных расходов через гидроузлы в период весеннего половодья. В этой связи для лиц, принимающих решения по пропуску половодья, особенно важно получение с наибольшей возможной заблаговременностью надежной информации о возможном режиме весеннего притока воды в водохранилища.

Принятые в настоящее время в отечественной оперативной практике методы долгосрочного прогноза объема весеннего притока воды в водохранилища Волжско-Камского каскада основаны на соотношениях между объемом талого стока и набором показателей, отражающих состояние водосбора перед снеготаянием: запасами воды в снеге, глубиной промерзания почвы и показателями ее увлажненности.

В качестве расчетных соотношений используются, как правило, физико-статистические зависимости, учитывающие, в определенной мере, представления о формировании потерь талого стока либо линейные уравнения множественной регрессии [6]. Осадки за период заблаговременности прогноза, величина которых входит в качестве предиктора в прогнозную методику, при расчете прогноза в оперативном режиме задаются как их климатическая норма.

Долгосрочный прогноз максимального расхода весеннего половодья рассчитывается по спрогнозированному объему стока на основе связи между этими величинами, построенной по данным наблюдений за предшествующие годы. Поскольку максимальный расход талого стока в большей степени зависит от метеорологических условий в период заблаговременности прогноза и в меньшей степени от начальных условий, прогноз максимального расхода заметно уступает в точности прогнозу объема талого стока.

Усиление требований к экономической эффективности и безопасности эксплуатации водноресурсных систем обуславливает необходимость привлечения дополнительных, к уже существующим, источников прогнозистической информации о характеристиках водного режима. Одним из возможных решений проблемы совершенствования методов долгосрочного прогнозирования с целью повышения его качества, надежности, увеличения информативности прогнозов может быть использование физико-математических моделей формирования речного стока (здесь и далее мы будем использовать термин «гидрологические модели»), описывающих гидрологический цикл бассейна реки (или водохранилища) с

использованием доступных данных метеорологических наблюдений, данных дистанционного зондирования земной поверхности, информации о природных особенностях бассейна.

Применение гидрологических моделей позволяет получить прогноз не только объема и максимального расхода стока, но и других характеристик водного режима, что дает дополнительную информацию для принятия решений, связанных с пропуском половодья через гидроузлы, и дает дополнительные возможности повышения экономической эффективности использования прогнозов.

Такой подход позволяет также перейти от традиционных детерминистических к ансамблевым прогнозам, результаты которых могут быть представлены как в детерминистической, так и в вероятностной форме с учетом различных источников ошибок прогнозов. Ансамблевый гидрологический прогноз позволяет разработать более гибкий режим управления водноресурсными системами, так как дает возможность оценить степень риска при вероятных ошибках прогноза.

Совершенствование «методов выпуска гидрометеорологических долгосрочных прогнозов (месяц, сезон), а также прогнозов экстремальных гидрометеорологических явлений и характеристик, обладающих большой степенью неопределенности, в вероятностной форме» признано российским профессиональным сообществом одной из приоритетных задач научных гидрологических исследований [5].

Цель настоящей статьи – исследование возможностей применения гидрологической модели для оперативного долгосрочного ансамблевого прогноза незарегулированного притока воды в Чебоксарское водохранилище в период весеннего половодья.

Статья построена следующим образом. В ее начале дан краткий обзор методов ансамблевого долгосрочного прогноза, разработанных за последние 10–15 лет. Затем описана используемая гидрологическая модель, требования к ее информационному обеспечению и приведены результаты испытания модели по данным стандартного гидрометеорологического мониторинга в бассейне Чебоксарского водохранилища. В третьем разделе описана методика долгосрочного прогноза гидрографа притока воды в водохранилище и задания ансамбля метеорологических условий за период заблаговременности прогноза.

Основное содержание статьи посвящено результатам верификации предлагаемой прогностической методики по данным проверочных прогнозов притока воды в водохранилище за 2 квартал в течение 35-летнего периода (1982–2016 годы), а также результатам оперативного испытания схемы прогноза на примере половодья 2017 года. В заключительном разделе обсуждаются возможности разработанной прогностической методики как источника дополнительной информации при принятии управленческих решений, а также пути повышения качества прогноза.

## 1. Обзор методов ансамблевого долгосрочного прогноза сезонного стока

Существенный источник неопределенности долгосрочного прогноза речного стока – изменчивость метеорологических условий за период его заблаговременности. Методика ансамблевых гидрологических прогнозов ESP (Ensemble Streamflow Prediction), учитывающая этот источник неопределенности, разработана и применяется в Системе прогнозов речного стока Национальной службы погоды США (НСП) для выпуска долгосрочных (заблаговременностью от нескольких недель до нескольких месяцев) прогнозов речного стока. Согласно указанной методике, прогноз рассчитывается по гидрологической модели, на входе которой задается ансамбль временных рядов метеорологических переменных, описывающих возможные сценарии погоды за период заблаговременности прогноза [7]. В качестве такого ансамбля используются наблюдаемые за прошлые годы данные о метеорологических переменных. В результате прогностическая методика ESP позволяет получить ансамбль гидрографов стока, из которых могут быть получены прогнозы характеристик стока (объема стока, максимального расхода, продолжительности половодья и других), как в детерминистической, так и в вероятностной формах. Начальные условия для ансамблевых экспериментов задаются по данным о состоянии водосбора на дату выпуска прогноза (запас воды в снеге, влажность почвы, глубина ее промерзания). При этом используются либо данные наблюдений, либо значения соответствующих характеристик, рассчитанные по данным метеорологических наблюдений за предшествующий период.

С середины 2000-х годов методика ESP ансамблевых долгосрочных прогнозов стала применяться в Центрах прогнозов стока НСП США [11], в оперативной практике Канады [8], европейских стран [13]. Внедрение прогностической методики ESP в оперативную практику США и других стран было стимулировано, в значительной степени, недостаточной точностью традиционных регрессионных методик прогнозов [9].

В ИВП РАН в середине 2000-х годов проведены исследования возможностей построения ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего стока с помощью гидрологических моделей с распределенными параметрами на примере рек Вятка, Сосна и Сейм [2, 3, 10]. Предложен метод расчета вероятных сценариев погоды за период заблаговременности прогноза с помощью стохастических моделей («генераторов погоды»).

Следует подчеркнуть, что правильная интерпретация и практическое использование ансамблевых прогнозов требует специальной подготовки как специалистов, непосредственно выпускающих гидрологические прогнозы, так и пользователей этих прогнозов. Лица, принимающие решение на их основе, должны иметь достаточное представление о методологии, положенной в основу ансамблевого прогнозирования, об исходной информации, используемой гидрологической модели и методах оценки неопределенности, об особенностях решаемой задачи. Вместе с тем,

адекватный учет информации, содержащейся в ансамблевом прогнозе, создает возможность получить представление о риске принятия тех или иных управленческих решений – возможность, которая отсутствует при детерминистическом прогнозировании.

## **2. Гидрологическая модель притока воды в Чебоксарское водохранилище: структура, информационное обеспечение, результаты калибровки и проверки**

В качестве расчетного блока для долгосрочного прогноза весеннего половодья используется гидрологическая модель, созданная в ИВП РАН на базе информационно-моделирующего комплекса (ИМК) ECOMAG<sup>1</sup>, разработанного Ю.Г. Мотовиловым [12].

Гидрологическая модель описывает процессы формирования и таяния снежного покрова, гидротермические процессы в почве при ее промерзании и оттаивании, инфильтрации воды в мерзлую и незамерзшую почву, испарения и эвапотранспирации, стекания воды по поверхности водосбора, подповерхностного и грунтового стока, движения воды в речной системе. Многочисленные примеры успешных испытаний ИМК ECOMAG по данным наблюдений в речных бассейнах площадью от десятков до миллионов км<sup>2</sup>, расположенных в разных климатических условиях, даны, например, в библиографии к статье [4].

Для схематизации водосбора Чебоксарского водохранилища и задания параметров гидрологической модели использовались цифровые модели рельефа с разрешением 1 км и серии цифровых тематических карт (почвенная, ландшафтная и т. д.). В качестве граничных условий задавались ряды среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, интенсивности осадков по данным наблюдений на 157 метеорологических станциях с 1.01.1982 по 31.07.2016. Расположение метеорологических станций и расчетные элементы гидрологической модели, построенные по данным о рельефе, показаны на рис. 1.

Гидрологическая модель позволяет по данным стандартных метеорологических наблюдений сети мониторинга Росгидромета рассчитать среднесуточные расходы притока воды в водохранилище за любой заданный период времени. Помимо притока воды в водохранилище модель позволяет рассчитать с пространственным разрешением порядка 300 км<sup>2</sup> и суточным разрешением по времени основные процессы формирования весеннего половодья.

Гидрологическая модель калибровалась и проверялась по данным о боковом притоке воды к Чебоксарскому водохранилищу за 35 лет – с начала его функционирования в 1982 году по 2016 год. Калибровка модели производилась по фактическим данным о притоке воды за период с

---

<sup>1</sup> Свидетельство о государственной регистрации в Роспатенте от 09.01.2013 №2013610703

2000 по 2014 годы; проверка модели на независимых данных производилась для периода 1982–1999 годы, а также за 2015 и 2016 годы.

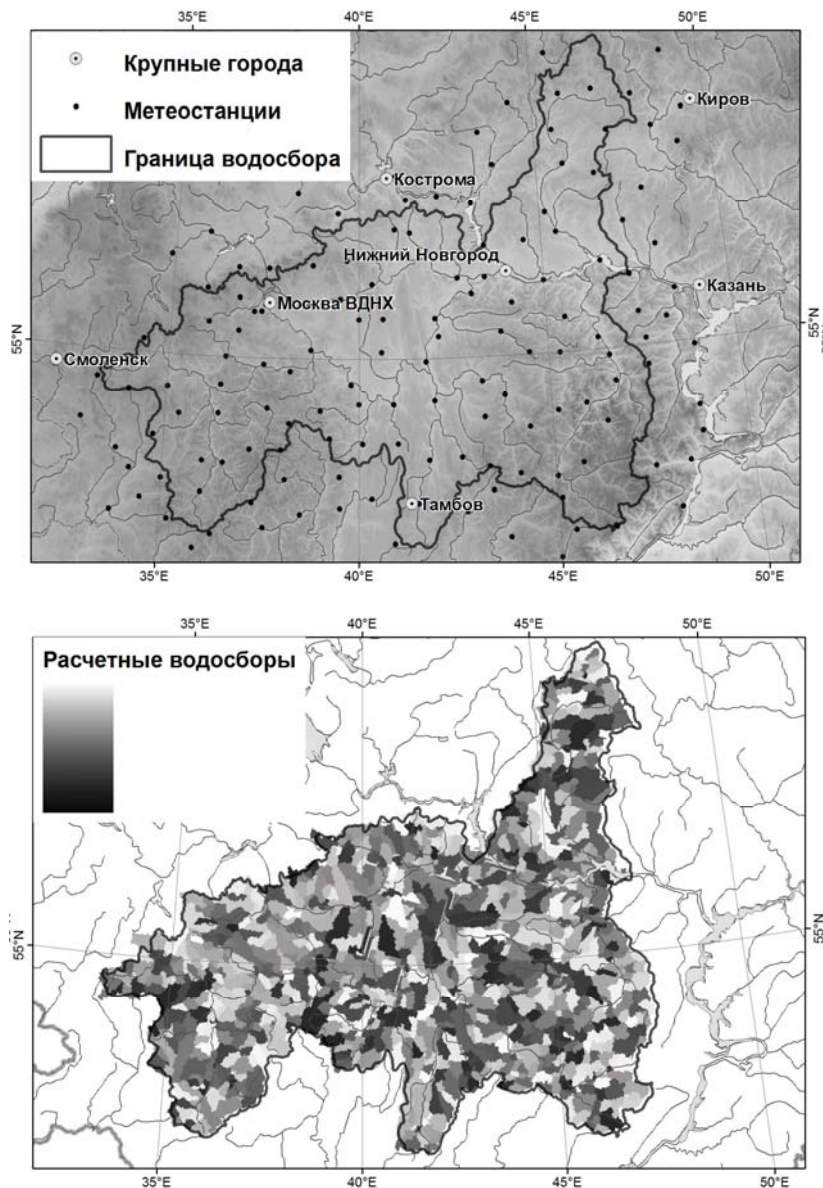


**Рис. 1.** Расположение метеорологических станций (сверху), данные измерений которых использованы для построения гидрологической модели, и схематизация водосбора водохранилища (снизу).

Рассчитанные ежедневные расходы воды за весь период сравниваются с фактическими величинами на рис. 2.

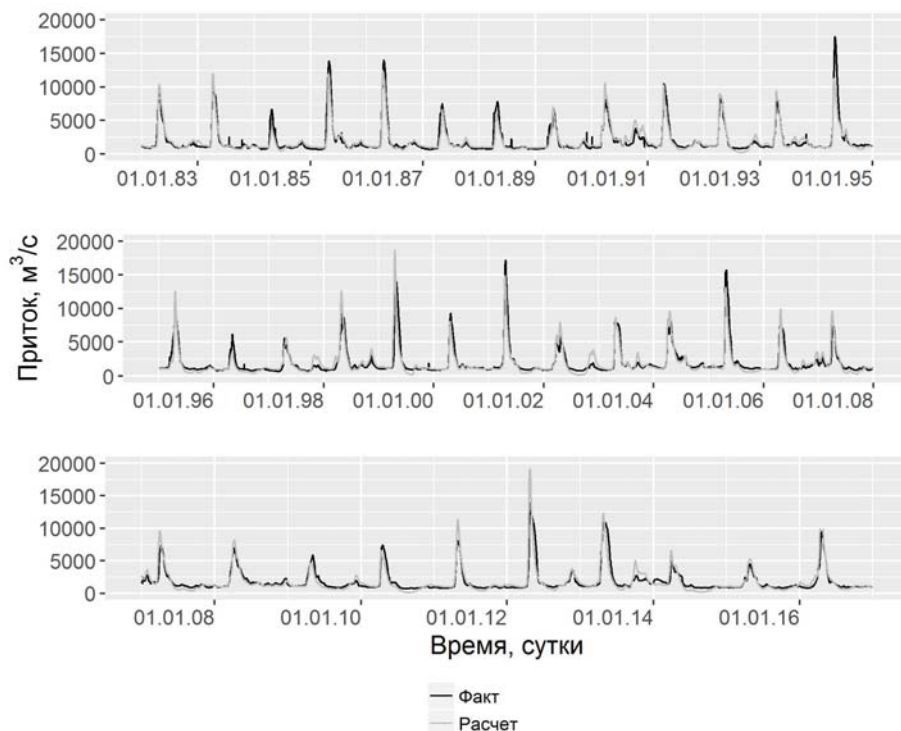


**Рис. 2.** Фактический (черный) и рассчитанный (серый) гидрографы среднесуточного притока воды к Чебоксарскому водохранилищу.

Систематическая относительная погрешность расчета ежедневного притока воды в водохранилище за 35-летний период оказалась близка к нулю, среднеквадратическая погрешность расчетов составила порядка  $745 \text{ м}^3/\text{с}$  при стандартном отклонении фактических величин  $2100 \text{ м}^3/\text{с}$ . В табл. 1 приведены результаты расчетов характеристик притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 2 квартал для периодов калибровки и проверки гидрологической модели.

Полученные удовлетворительные результаты апробации модели по данным гидрометеорологических наблюдений дают основание использовать ее в качестве расчетного блока разрабатываемой схемы долгосрочного прогноза притока воды к водохранилищу.

### 3. Схема долгосрочного ансамблевого прогноза

Схема долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу состоит в последовательном применении следующих расчетных процедур:

1. По данным метеорологических наблюдений за предшествующий осенне-зимний период с помощью гидрологической модели рассчитываются характеристики водосбора (запасы воды в снежном покрове, глубина

промерзания и влажность почвы, запас воды в русловой сети и др.) на дату выпуска прогноза.

2. По данным наблюдений за 50 лет (1967–2016 гг.) для 157 метеорологических станций (см. рис. 1) строится ансамбль из  $N=50$  сценариев погоды – возможных метеорологических условий на период заблаговременности прогноза<sup>2</sup> (например, 1 апреля – 30 июня, если прогноз выпускается на 2 квартал).

**Таблица 1.** Расчет объема и максимального расхода притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2 квартал с помощью гидрологической модели по данным метеорологических наблюдений

|                                                  | Калибровка параметров (2000–2010) | Проверка на независимом материале (1982–1999; 2011–2016) | Весь период расчетов (1982–2016) |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Объем притока $W^{II}$ , км <sup>3</sup>         |                                   |                                                          |                                  |
| $W^{II}_{\text{модель}}$                         | 32,6                              | 32,9                                                     | 32,8                             |
| $W^{II}_{\text{факт}}$                           | 33,0                              | 33,5                                                     | 33,4                             |
| Систематическая погрешность расчета, %           | -1                                | -2                                                       | -2                               |
| Максимальный расход $Q^{II}$ , м <sup>3</sup> /с |                                   |                                                          |                                  |
| $Q^{II}_{\text{модель}}$                         | 8490                              | 8895                                                     | 8705                             |
| $Q^{II}_{\text{факт}}$                           | 9219                              | 9413                                                     | 9351                             |
| Систематическая погрешность расчета, %           | -8                                | -6                                                       | -7                               |

3. По смоделированным начальным условиям на дату выпуска прогноза и сценариям погоды за период заблаговременности прогноза, задаваемым на входе гидрологической модели, рассчитывается ансамбль из 50-ти прогнозируемых гидрографов притока воды к водохранилищу.

4. По ансамблю 50 прогнозируемых гидрографов строятся соответствующие ансамбли следующих характеристик притока воды к водохранилищу за период заблаговременности прогноза: объема ( $W$ , км<sup>3</sup>), максимального расхода ( $Q_{\text{макс}}$ , м<sup>3</sup>/с), продолжительности периодов высокой водности ( $N_{\text{Qcp}}$ , сут. – число дней с расходом воды выше нормы, 4250 м<sup>3</sup>/с,

<sup>2</sup> Под «сценарием метеорологических условий на период заблаговременности прогноза» здесь понимается совокупность временных рядов метеорологических величин, задаваемых на период заблаговременности с тем пространственно-временным разрешением, которое позволяет использовать эти ряды в качестве «входов» в гидрологическую модель для расчета гидрографа стока. Для используемой гидрологической модели это ряды суточных значений осадков, температуры и влажности воздуха, задаваемые в 157 точках водосбора.

$N_{Q_{\max}}$ , сут. – число дней с расходом выше среднего максимального расхода,  $9355 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

5. Строится детерминистический прогноз каждой из прогнозируемых характеристик притока воды к водохранилищу как среднее значение из ансамбля.

6. Строится вероятностный прогноз каждой из прогнозируемых характеристик притока воды к водохранилищу в виде функций распределения вероятности прогнозируемых величин и доверительных интервалов прогноза.

Схема прогноза показана на рис. 3.

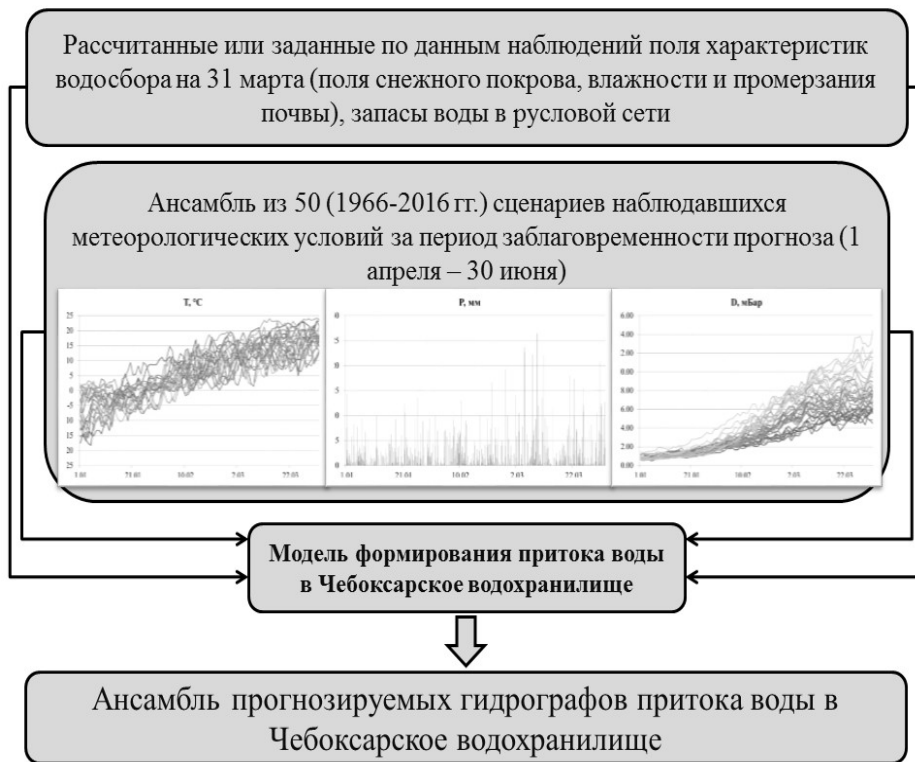


**Рис. 3.** Схема долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу за 2 квартал.

На рис. 4 в качестве примера показан ансамбль прогнозируемых по описанной схеме гидрографов стока за период заблаговременности 1 марта – 31 мая 2009 года.

Ниже представлены результаты применения описанной схемы для построения проверочных прогнозов характеристик притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 35 сезонов (1982–2016 годы).

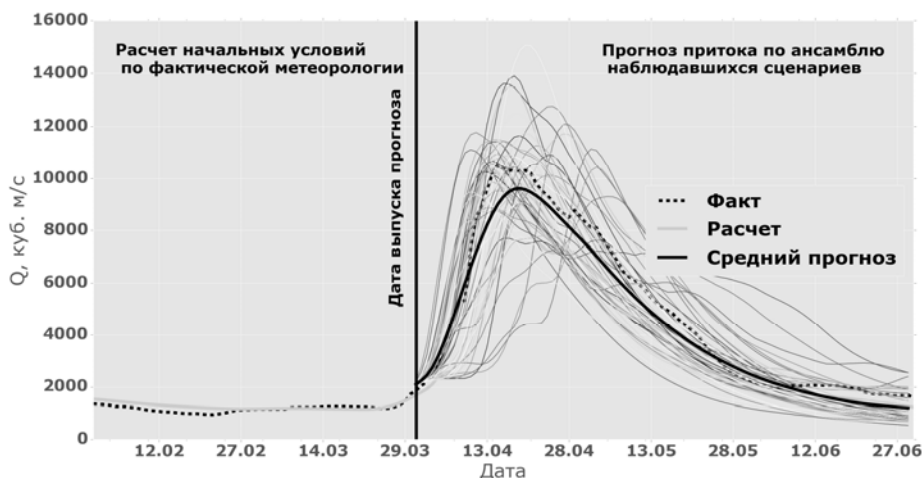


**Рис. 4.** Пример построения ансамбля проверочных прогнозов притока воды к водохранилищу по разработанной прогностической схеме.

#### 4. Результаты проверочных прогнозов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 1982–2016 годы

##### 4.1. Детерминистический прогноз

При построении детерминистических прогнозов предполагалось, что наиболее вероятная характеристика притока равна среднему значению из ансамбля соответствующих характеристик. В табл. 2, 3 показаны результаты построенных по описанной выше схеме проверочных прогнозов величин  $W$  (км<sup>3</sup>),  $Q_{\max}$  (м<sup>3</sup>/с),  $N_{Q_{\text{ср}}}$  (сут.),  $N_{Q_{\max}}$  (сут.) за 2 квартал 1982–2016 годов.

В табл. 4 приведены критерии качества построенных детерминистических прогнозов: критерий эффективности, рассчитываемый как отношение среднеквадратических погрешностей  $S$  прогноза к среднеквадратическому отклонению  $\sigma$  фактических характеристик; критерий оправдываемости прогнозов характеристик водного режима – доля ошибок прогноза, лежащих в пределах допустимой погрешности, равной  $0,674\sigma$  [6]

Из табл. 4 видно, что разработанная методика дает удовлетворительные результаты долгосрочного прогноза объема и максимального расхода притока воды в водохранилище за 2 квартал, а также числа дней с расходами воды выше среднего максимального значения. По критерию эффективности  $S/\sigma$  прогнозы могут считаться удовлетворительными ( $S/\sigma$  не превышает 0,70), а их оправдываемость находится в пределах 70–80 %.

**Таблица 2.** Детерминистический прогноз объема и максимального расхода притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 2 квартал

| Год     | Объем притока воды,<br>км <sup>3</sup> |              |              |              | Макс. расход притока воды,<br>м <sup>3</sup> /с |             |             |             |
|---------|----------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|         | Факт.                                  | Прогноз      | Абс. ошибка  | Отн. ошибка  | Факт.                                           | Прогноз     | Абс. ошибка | Отн. ошибка |
| 1982    | 35,52                                  | 32,91        | -2,62        | -0,07        | 9350                                            | 9712        | 362         | 35,52       |
| 1983    | 34,51                                  | 38,02        | 3,51         | 0,10         | 10100                                           | 11025       | 925         | 34,51       |
| 1984    | 20,78                                  | 17,29        | -3,49        | -0,17        | 6700                                            | 4277        | -2423       | 20,78       |
| 1985    | 45,71                                  | 35,85        | -9,86        | -0,22        | 13900                                           | 11528       | -2372       | 45,71       |
| 1986    | 44,81                                  | 39,71        | -5,09        | -0,11        | 14000                                           | 12047       | -1953       | 44,81       |
| 1987    | 29,56                                  | 23,90        | -5,66        | -0,19        | 7500                                            | 6653        | -847        | 29,56       |
| 1988    | 30,50                                  | 28,32        | -2,18        | -0,07        | 7810                                            | 7985        | 175         | 30,50       |
| 1989    | 25,91                                  | 27,13        | 1,22         | 0,05         | 6700                                            | 6895        | 195         | 25,91       |
| 1990    | 29,70                                  | 33,99        | 4,29         | 0,14         | 8130                                            | 9476        | 1346        | 29,70       |
| 1991    | 38,35                                  | 35,50        | -2,85        | -0,07        | 10500                                           | 10677       | 177         | 38,35       |
| 1992    | 33,14                                  | 33,36        | 0,22         | 0,01         | 8260                                            | 8806        | 546         | 33,14       |
| 1993    | 30,21                                  | 33,81        | 3,60         | 0,12         | 8870                                            | 9392        | 522         | 30,21       |
| 1994    | 55,33                                  | 40,99        | -14,34       | -0,26        | 17500                                           | 13232       | -4268       | 55,33       |
| 1995    | 35,15                                  | 33,07        | -2,08        | -0,06        | 9780                                            | 9597        | -183        | 35,15       |
| 1996    | 19,71                                  | 19,52        | -0,20        | -0,01        | 6140                                            | 5040        | -1100       | 19,71       |
| 1997    | 22,73                                  | 21,12        | -1,61        | -0,07        | 5570                                            | 5245        | -325        | 22,73       |
| 1998    | 37,00                                  | 37,12        | 0,12         | 0,00         | 9290                                            | 11374       | 2084        | 37,00       |
| 1999    | 46,12                                  | 51,13        | 5,01         | 0,11         | 14100                                           | 17389       | 3289        | 46,12       |
| 2000    | 30,96                                  | 28,25        | -2,72        | -0,09        | 9290                                            | 8118        | -1172       | 30,96       |
| 2001    | 47,33                                  | 42,38        | -4,95        | -0,10        | 17200                                           | 13840       | -3360       | 47,33       |
| 2002    | 25,28                                  | 32,67        | 7,40         | 0,29         | 5850                                            | 7853        | 2003        | 25,28       |
| 2003    | 34,09                                  | 29,46        | -4,64        | -0,14        | 8310                                            | 8257        | -53         | 34,09       |
| 2004    | 38,27                                  | 37,88        | -0,38        | -0,01        | 8540                                            | 10144       | 1604        | 38,27       |
| 2005    | 49,90                                  | 37,72        | -12,18       | -0,24        | 15750                                           | 12079       | -3671       | 49,90       |
| 2006    | 31,94                                  | 27,24        | -4,70        | -0,15        | 8680                                            | 8000        | -680        | 31,94       |
| 2007    | 25,45                                  | 27,66        | 2,21         | 0,09         | 7490                                            | 9046        | 1556        | 25,45       |
| 2008    | 27,95                                  | 33,47        | 5,52         | 0,20         | 6990                                            | 8234        | 1244        | 27,95       |
| 2009    | 24,66                                  | 26,37        | 1,71         | 0,07         | 5890                                            | 7090        | 1200        | 24,66       |
| 2010    | 27,49                                  | 30,46        | 2,97         | 0,11         | 7420                                            | 7951        | 531         | 27,49       |
| 2011    | 26,57                                  | 35,52        | 8,95         | 0,34         | 8100                                            | 11511       | 3411        | 26,57       |
| 2012    | 44,63                                  | 41,39        | -3,24        | -0,07        | 13850                                           | 14026       | 176         | 44,63       |
| 2013    | 46,45                                  | 45,42        | -1,03        | -0,02        | 10900                                           | 15534       | 4634        | 46,45       |
| 2014    | 19,95                                  | 23,34        | 3,38         | 0,17         | 4940                                            | 6594        | 1654        | 19,95       |
| 2015    | 22,91                                  | 20,39        | -2,52        | -0,11        | 4520                                            | 4667        | 147,11      | 0,03        |
| 2016    | 36,88                                  | 37,09        | 0,21         | 0,01         | 9510                                            | 9992        | 481,75      | 0,05        |
| Среднее | <b>33,58</b>                           | <b>32,56</b> | <b>-1,03</b> | <b>-0,01</b> | <b>9355</b>                                     | <b>9522</b> | <b>167</b>  | <b>0,04</b> |

**Таблица 3.** Детерминистический прогноз продолжительности периодов высокой водности притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 2 квартал

| Год     | Число дней с расходами воды >4250 м³/с, сут |              |              |             | Число дней с расходами воды >9497 м³/с, сут. |             |              |             |
|---------|---------------------------------------------|--------------|--------------|-------------|----------------------------------------------|-------------|--------------|-------------|
|         | Факт.                                       | Прогноз      | Абс. ошибка  | Отн. ошибка | Факт.                                        | Прогноз     | Абс. ошибка  | Отн. ошибка |
| 1982    | 46                                          | 36,42        | -9,58        | -0,21       | 0                                            | 4,77        | 4,77         | 0,00        |
| 1983    | 39                                          | 43,42        | 4,42         | 0,11        | 6                                            | 11,85       | 5,85         | 0,98        |
| 1984    | 20                                          | 6,54         | -13,46       | -0,67       | 0                                            | 0,00        | 0,00         | 0,00        |
| 1985    | 42                                          | 37,71        | -4,29        | -0,10       | 24                                           | 10,42       | -13,58       | -0,57       |
| 1986    | 45                                          | 42,23        | -2,77        | -0,06       | 25                                           | 13,46       | -11,54       | -0,46       |
| 1987    | 36                                          | 24,98        | -11,02       | -0,31       | 0                                            | 0,15        | 0,15         | 0,00        |
| 1988    | 37                                          | 31,44        | -5,56        | -0,15       | 0                                            | 1,00        | 1,00         | 0,00        |
| 1989    | 23                                          | 29,75        | 6,75         | 0,29        | 0                                            | 0,15        | 0,15         | 0,00        |
| 1990    | 30                                          | 42,19        | 12,19        | 0,41        | 0                                            | 1,21        | 1,21         | 0,00        |
| 1991    | 43                                          | 38,92        | -4,08        | -0,09       | 11                                           | 8,04        | -2,96        | -0,27       |
| 1992    | 42                                          | 41,69        | -0,31        | -0,01       | 0                                            | 2,17        | 2,17         | 0,00        |
| 1993    | 35                                          | 38,54        | 3,54         | 0,10        | 0                                            | 4,10        | 4,10         | 0,00        |
| 1994    | 52                                          | 41,60        | -10,40       | -0,20       | 27                                           | 16,31       | -10,69       | -0,40       |
| 1995    | 44                                          | 36,63        | -7,38        | -0,17       | 5                                            | 4,50        | -0,50        | -0,10       |
| 1996    | 16                                          | 13,15        | -2,85        | -0,18       | 0                                            | 0,00        | 0,00         | 0,00        |
| 1997    | 20                                          | 15,48        | -4,52        | -0,23       | 0                                            | 0,00        | 0,00         | 0,00        |
| 1998    | 44                                          | 39,71        | -4,29        | -0,10       | 0                                            | 10,33       | 10,33        | 0,00        |
| 1999    | 43                                          | 50,15        | 7,15         | 0,17        | 25                                           | 22,69       | -2,31        | -0,09       |
| 2000    | 36                                          | 31,42        | -4,58        | -0,13       | 0                                            | 1,17        | 1,17         | 0,00        |
| 2001    | 42                                          | 42,29        | 0,29         | 0,01        | 22                                           | 17,10       | -4,90        | -0,22       |
| 2002    | 30                                          | 44,23        | 14,23        | 0,47        | 0                                            | 0,71        | 0,71         | 0,00        |
| 2003    | 41                                          | 33,35        | -7,65        | -0,19       | 0                                            | 1,40        | 1,40         | 0,00        |
| 2004    | 45                                          | 44,65        | -0,35        | -0,01       | 0                                            | 7,54        | 7,54         | 0,00        |
| 2005    | 46                                          | 39,46        | -6,54        | -0,14       | 27                                           | 13,08       | -13,92       | -0,52       |
| 2006    | 38                                          | 30,23        | -7,77        | -0,20       | 0                                            | 1,04        | 1,04         | 0,00        |
| 2007    | 25                                          | 29,85        | 4,85         | 0,19        | 0                                            | 0,00        | 0,00         | 0,00        |
| 2008    | 24                                          | 43,38        | 19,38        | 0,81        | 0                                            | 0,88        | 0,88         | 0,00        |
| 2009    | 23                                          | 29,10        | 6,10         | 0,27        | 0                                            | 0,21        | 0,21         | 0,00        |
| 2010    | 32                                          | 35,33        | 3,33         | 0,10        | 0                                            | 1,00        | 1,00         | 0,00        |
| 2011    | 29                                          | 37,15        | 8,15         | 0,28        | 0                                            | 10,46       | 10,46        | 0,00        |
| 2012    | 44                                          | 41,02        | -2,98        | -0,07       | 27                                           | 16,88       | -10,13       | -0,38       |
| 2013    | 51                                          | 43,58        | -7,42        | -0,15       | 27                                           | 20,10       | -6,90        | -0,26       |
| 2014    | 9                                           | 23,90        | 14,90        | 1,66        | 0                                            | 0,00        | 0,00         | 0,00        |
| 2015    | 10                                          | 11,13        | 1,13         | 0,11        | 0                                            | 0,00        | 0,00         | 1,00        |
| 2016    | 36                                          | 43,98        | 7,98         | 0,22        | 1                                            | 6,27        | 5,27         | 2,00        |
| Среднее | <b>34,80</b>                                | <b>34,70</b> | <b>-0,10</b> | <b>0,05</b> | <b>6,49</b>                                  | <b>5,97</b> | <b>-0,51</b> | <b>0,02</b> |

Менее точными получились прогнозы числа дней с расходами воды выше среднесноголетнего расхода. Полученный результат демонстрирует возможности разработанной прогностической методики, которая позволяет, благодаря использованию гидрологической модели, прогнозировать с удовлетворительной точностью и трехмесячной заблаговременностью не только объем весеннего стока, но и другие характеристики водного режима, расширяя тем самым информационное содержание прогнозов по сравнению с существующими подходами.

**Таблица 4.** Эффективность детерминистического прогноза характеристик притока воды в водохранилище за 2 квартал (прогноз по средним значениям из ансамбля)

| <b>W, км<sup>3</sup></b> |                 | <b>Q<sub>max</sub>, м<sup>3</sup>/с</b> |                 | <b>N<sub>Qcp</sub>, сут.</b> |                 | <b>N<sub>Qmax</sub>, сут.</b> |                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| S/σ                      | Оправдываемость | S/σ                                     | Оправдываемость | S/σ                          | Оправдываемость | S/σ                           | Оправдываемость |
| 0,55                     | 86 %            | 0,57                                    | 77 %            | 0,72                         | 66 %            | 0,55                          | 77 %            |

#### 4.2. Вероятностный прогноз

Результаты ансамблевых прогнозов гидрографов весеннего стока могут быть представлены в вероятностной форме, что дает возможность пользователю прогноза оценить риск принятия решений и выстроить на этом основании более гибкую систему управления водноресурсной системой, принять более эффективные меры защиты от опасных гидрологических явлений, чем в случае детерминистического (однозначного) прогноза.

Наиболее распространенное и информативное представление вероятностного прогноза речного стока заключается в построении функции распределения вероятности (ФРВ) прогнозируемой величины. На сравнении ФРВ прогнозируемой и наблюдаемой величин стока основаны методы верификации вероятностных прогнозов, широко применяемые в оперативной метеорологии [1, 14] и со сравнительно недавних пор используемые для оценки качества ансамблевых гидрологических прогнозов (первые примеры такого использования в отечественных публикациях показаны в [2, 3]).

Ординаты интегрального распределения вероятности прогнозируемой характеристики водного режима  $y_{np}$  для  $j$ -го сезона из проверочного ряда рассчитываются как

$$F_m(j) = \sum_{i=1}^m f_i(j), \quad m=1, \dots, M; \quad j=1, \dots, N; \quad (1)$$

где  $M$  – число интервалов вероятностей, на которое разбивается интервал  $[0;1]$ ;  $N$  – число проверочных прогнозов;  $f_i$  – частота попадания прогнозируемой величины в заданный интервал.

Ординаты интегрального распределения вероятности фактической характеристики стока  $y_{\text{факт}}$  для  $j$ -го сезона из проверочного ряда оцениваются как

$$O_m(j) = \sum_{i=1}^m o_i, \quad m=1, \dots, M; j=1, \dots, N, \quad (2)$$

где  $o_i=1$  в интервале, куда попала наблюдаемая величина, и  $o_i=0$  в остальных интервалах.

На рис. 5 показаны функции распределения прогнозируемых объемов и максимальных расходов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу, построенные по полученным в результате ансамблевых экспериментов выборкам объемом 50 значений для характерных сезонов 1986, 1992 и 1997 гг. (высокое, среднее и низкое половодья соответственно). На этом же рисунке показаны функции распределения фактических величин стока.

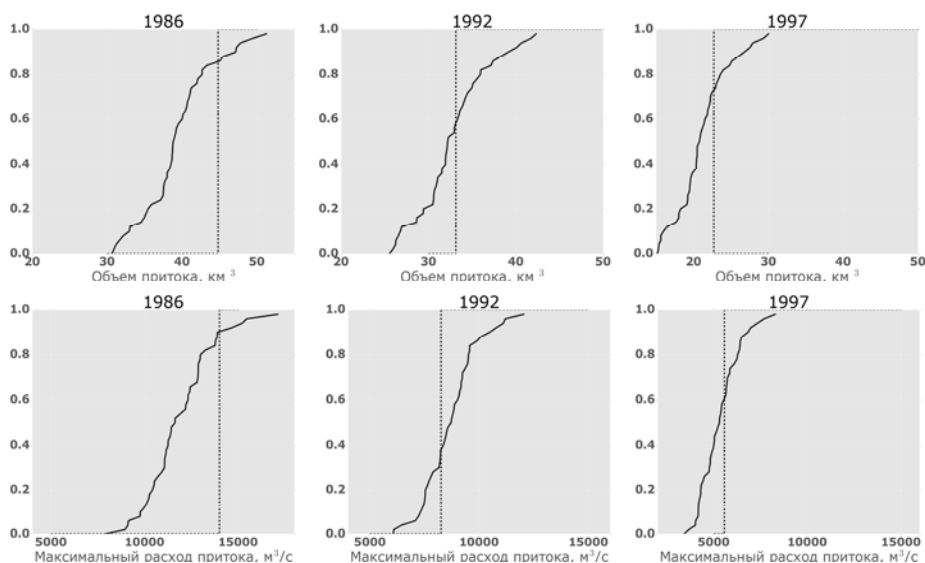


**Рис. 5.** Интегральные функции распределения долгосрочных прогнозов объема (вверху) и максимального расхода (внизу) притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за 2 квартал (сплошная линия) в сравнении с распределением фактических характеристик стока (пунктирная линия) для половодий 1986, 1992 и 1997 гг.

По приведенным иллюстрациям можно сделать выводы, например, о доверительном интервале прогнозируемых значений характеристик стока. Так, согласно проверочному долгосрочному вероятностному прогнозу высокого половодья 1986 г. его объем с вероятностью 90 % находится в диапазоне от 31 до 50 км<sup>3</sup> (фактический объем стока за 2 квартал в 1986 г. был

45 км<sup>3</sup>). Для низкого половодья 1997 г. 90%-ный доверительный интервал прогноза составил 16–29 км<sup>3</sup> (фактический объем в 1997 г. – 23 км<sup>3</sup>). Для среднего половодья 1992 г. 90%-ный доверительный интервал прогноза составил 26–43 км<sup>3</sup> (фактический объем в 2003 г. – 33 км<sup>3</sup>). О хорошей точности прогноза объема стока для этих лет свидетельствует также то, что средний объем стока для этих лет получился близким к фактическому, что также видно из сравнения кривых распределения.

Долгосрочный вероятностный прогноз максимальных расходов имеет большую неопределенность. 90%-ные доверительные интервалы прогнозов равны: в 1986 г. – от 9100 до 15800 м<sup>3</sup>/с (фактический максимальный расход в 1986 г. – 14000 м<sup>3</sup>/с), 1997 г. – от 3580 до 7590 м<sup>3</sup>/с (фактический максимальный расход в 1997 г. – 5570 м<sup>3</sup>/с), 1992 г. – от 6310 до 11430 м<sup>3</sup>/с (фактический максимальный расход в 1992 г. – 8260 м<sup>3</sup>/с).

Эффективность прогностической методики по сравнению с климатическим прогнозом (т. е. использованием в качестве прогноза безусловного распределения вероятности наблюдаемых величин стока) оценивается величиной:

$$RPSS = 1 - \frac{\overline{RPS}}{\overline{RPS}_{cl}}, \quad (3)$$

где  $\overline{RPS}$  – так называемая оценка ранжированной вероятности (Ranked Probability Score) – погрешность вероятностных прогнозов, осредненная по всем ансамблям и по всему диапазону вероятностей, рассчитываемая по формуле:

$$\overline{RPS} = \sum_{m=1}^M MSE_m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M (F_m(j) - O_m(j))^2, \quad (4)$$

где  $\overline{RPS}_{cl}$  – величина  $\overline{RPS}$  для климатического прогноза, которая рассчитывается по формуле (4), при этом  $F_m(j)$  определяются по интегральному распределению фактических величин стока, построенному по многолетнему ряду наблюдений.

По осредненным значениям  $RPS$  было рассчитано значение показателя  $RPSS$ , который характеризует эффективность оцениваемой методики по сравнению с климатическим прогнозом. Положительные значения этого показателя показывают наличие дополнительной информации в прогнозе, получаемом по оцениваемой методике, а идеальным значением его является 1.

Для прогноза объема притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2 квартал значение  $RPSS$  составило 0,304. Иными словами, вероятностный прогноз объема половодья оказался на 30 % эффективнее климатического прогноза.

## 5. Опыт оперативного прогноза притока воды к водохранилищу во 2 квартале 2017 года

Условия формирования половодья 2017 года в бассейне Чебоксарского водохранилища заметно отличались от среднегодовых условий. При этом состояние водосбора перед началом снеготаяния было близким к норме: запас воды в снеге на начало марта был несколько выше нормы (на 10–15 %), запас воды в почве и глубина ее промерзания – близки к норме. Однако, установившаяся уже в первой половине марта на всей территории бассейна необычно теплая и солнечная погода способствовала тому, что интенсивное таяние снежного покрова и подъем уровня воды в реках начались на полмесяца раньше средних климатических сроков. В третьей декаде марта осуществилось вторжение более холодных и влажных воздушных масс в бассейн Средней Волги, что привело к выпадению обильных осадков, общее количество которых превысило четверть месячной нормы марта. В результате такого развития метеорологических процессов, в марте объем притока воды в водохранилище превысил норму почти на треть. Периоды интенсивного таяния, периодически сменяющиеся резким многодневным похолоданием и выпадением большого количества осадков, в том числе снега, наблюдались и далее, в течение апреля-мая 2017 года (на ряде станций выпадение твердых осадков наблюдалось даже в начале июня). Разнообразие погодных условий формирования речного стока в период снеготаяния, их существенное отличие от среднегодовых условий, отразилось на режиме притока воды в Чебоксарское водохранилище: гидрограф притока воды к водохранилищу в период половодья 2017 года заметно отличался от среднегодового.

Описанная выше прогностическая система была протестирована специалистами ИВП РАН и Гидрометцентра России в оперативном режиме в течение 2 квартала 2017 года. Прогнозы характеристик притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2 квартал (период 1 апреля – 30 июня) выпускались по описанной выше схеме 1, 15 и 27 марта. Кроме того, 15 и 27 апреля выпускались уточненные прогнозы с учетом фактического притока за период, прошедший дате выпуска уточнения. На рис. 6 приведены ансамбли прогностических гидрографов от даты выпуска прогноза до 30 июня в сравнении с фактическим гидрографом стока с 1 апреля по 30 июня.

Полученные значения объема притока и максимального расхода, осредненные по ансамблям гидрографов, рассчитанных при разных датах выпуска прогноза, приведены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, прогнозируемая величина объема притока воды в водохранилище оказалась выше фактической для всех дат выпуска прогноза. При этом погрешности прогноза оказались невелики, и уже при заблаговременности прогноза 3,5 месяца (дата выпуска прогноза 15 марта) стали ниже погрешности климатического прогноза. С дальнейшим уменьшением заблаговременности прогноза его погрешность еще более снизилась. Погрешность прогноза максимального расхода оказалась существенно выше: при заблаговременности 3 месяца составила 37 %, что связано

прежде всего с упоминавшимися выше отличиями метеорологических условий снеготаяния 2017 года от среднемноголетних.

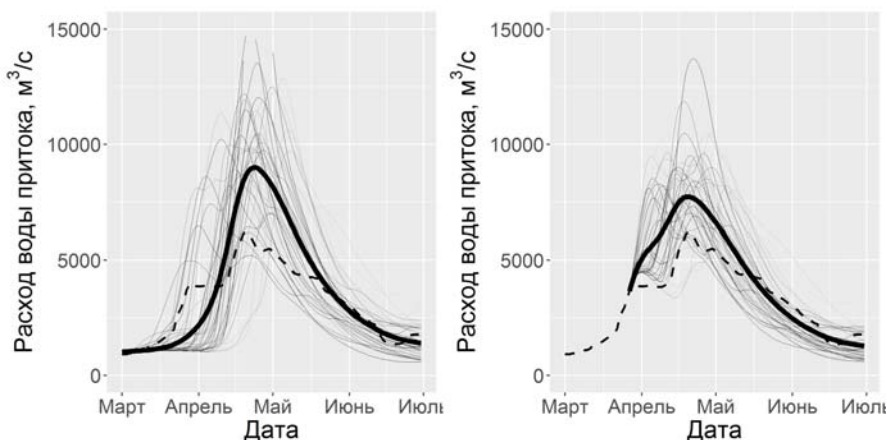


**Рис. 6.** Ансамблевый прогноз притока воды к Чебоксарскому водохранилищу при разных датах выпуска прогноза: прогноз на период 1 марта – 30 июня (слева); 27 марта – 30 июня (справа); пунктирная линия – фактический гидрограф; тонкие серые линии – ансамбль прогнозируемых гидрографов; жирная линия – средний по ансамблю гидрограф.

**Таблица 5.** Сведения о фактическом и спрогнозированном притоке воды в Чебоксарское водохранилище за второй квартал 2017 года

| Дата выпуска прогноза | Наиболее вероятное значение ожидаемого притока воды за 2 квартал, км <sup>3</sup> | Фактический приток воды за 2 квартал, км <sup>3</sup> | Абсолютная ошибка прогноза, км <sup>3</sup> | Ошибка прогноза в % от фактического притока | Абсолютная (в км <sup>3</sup> )/ относительная (в % от фактического притока) ошибка климатического прогноза |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.03.2017             | 35,0                                                                              | 28,9                                                  | 6,1                                         | 21%                                         | 4,50 / 16%                                                                                                  |
| 15.03.2017            | 33,2                                                                              | 28,9                                                  | 4,3                                         | 15%                                         | 4,50 / 16%                                                                                                  |
| 29.03.2017            | 32,8                                                                              | 28,9                                                  | 3,9                                         | 13%                                         | 4,50 / 16%                                                                                                  |
| 15.04.2017            | 30,4                                                                              | 28,9                                                  | 1,6                                         | 5%                                          | 4,50 / 16%                                                                                                  |
| 27.04.2017            | 31,5                                                                              | 28,9                                                  | 2,7                                         | 9%                                          | 4,50 / 16%                                                                                                  |

### Заключение

В статье описана методика долгосрочного ансамблевого прогноза весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище, которая основана на использовании гидрологической модели, созданной в ИВП РАН на базе ИМК ЕСOMAG. Проведена проверка предлагаемой методики по данным наблюдений за 35 лет – с года наполнения водохранилища. Описаны результаты оперативных испытаний гидрологической модели по данным

наблюдений в 2017 году. Удовлетворительные результаты проверочных прогнозов дают основание рассматривать предлагаемую методику как источник дополнительных, по отношению к существующим, прогностических данных о характеристиках режима притока воды в водохранилище, что расширяет информационное содержание прогноза для лиц, принимающих решение. По сравнению с традиционно используемыми в России методами долгосрочного прогноза объема притока воды в водохранилища, разрабатываемая методика позволяет:

1. Оценить характеристики начальных (на дату выпуска прогноза) условий в бассейне Чебоксарского водохранилища (запасы воды в снеге и в русловой сети, влажность и промерзание почвы) только по данным стандартных метеорологических наблюдений, что является существенным достоинством методики в условиях сокращения сети гидрометеорологических станций и постов Росгидромета.

2. Прогнозировать не только объем и максимальный расход, но и другие характеристики водного режима (например, продолжительности периодов заданной водности), что позволяет расширить содержание выпускаемых прогнозов для потребителей.

3. Выпускать прогноз не только в детерминистической, но и в вероятностной формах в рамках одной методики.

4. Прогнозировать характеристику притока с любой выбранной даты, т. е. на единой методической основе может выпускаться прогноз водного режима, как на период весеннего половодья, так и летней межени. Существующие же методики долгосрочного гидрологического прогноза различаются в зависимости от прогнозируемой фазы водного режима, расчетными схемами, требованиями к исходной информации, предикторами и точностью их оценки по данным измерений, набором параметров и т. п.

Вместе с тем, несмотря на успешную в целом верификацию методики по данным о проверочных прогнозах, выявлены возможные пути повышения ее точности. К таким возможностям прежде всего относятся:

1. Корректировка начальных условий, рассчитываемых гидрологической моделью по фактическим метеорологическим данным за осенне-зимний период до даты выпуска прогноза, с учетом имеющихся данных наблюдений о предшествующем состоянии водосбора, в частности о запасах воды в снеге и в речной сети.

2. Усвоение данных среднесрочного (до 10 суток) и, возможно, сезонного метеорологических прогнозов для уточнения ансамбля сценариев погоды на период заблаговременности прогноза.

В настоящее время начата модернизация описанной прогностической методики, с учетом указанных возможностей, для ее оперативного тестирования на данных будущего половодья 2018 года.

*Поступила в редакцию 21.09.2017 г.*

## Список использованных источников

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Вероятностные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 272 с.
2. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 54-67
3. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 83-95
4. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы, 2016, Т. 43, № 3. С. 243-253.
5. Решение совместного заседания НТС Росгидромета, Научного совета РАН «Исследования по теории климата Земли» и НТС Росводресурсов по вопросу «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации», Москва, 20 января 2014 г. // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. Сборник докладов. М.: Росгидромет, 2014. 207 с.
6. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 358 с.
7. Day G.N. Extended streamflow forecasting using NWS-RFS J // Water Resour. Planning Manage. 1985. Vol. 111. P. 157-170
8. Druce D.J. Insights from a history of seasonal inflow forecasting with a conceptual hydrologic model // J. Hydrol. 2001. Vol. 249. P. 102-112.
9. Gelfan A.N., Motovilov Yu.G. Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospect // Geography Compass. 2009. Vol. 3(5). P. 1841-1864. doi:10.1111/j.1749-8198.2009.00256.x.
10. Gelfan A., Motovilov Yu., Moreido V. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir // Proc. IAHS. 2015. Vol. 369. P. 115-120. doi:10.5194/piahs-369-115-2015.
11. McEnery J., Ingram J., Duan Q., Adams T., Anderson L. NOAA's advanced hydrologic prediction service: building pathways for better science in water forecasting // Am. Meteorol. Soc. 2005. Vol. 86. P. 375-385.
12. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. OSLO, NORWAY: Department of Geophysics, University of Oslo, 1999. 88 p.
13. Pappenberger F. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe // Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting / Duan et al. (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. P. 1-35. doi 10.1007/978-3-642-40457-3\_47-1.
14. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences: chapter 7. San Diego: Academic Press, 1995.

## SUMMARIES

**Long-term ensemble forecasting of spring inflow into the Cheboksary reservoir based on the hydrological model: results of operational testing** / Borsch S.V., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Motovilov Yu.G., Siminov Yu.A. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 68-86.

A feasibility assessment for using of the hydrological model ECOMAG for operational long-term (3-4 months ahead) ensemble forecasting of unregulated water inflow into the Cheboksary reservoir during the spring freshet is presented. The results are given for hindcasts of water inflow into the reservoir for 35-year-long period (1982-2016). The proposed scheme has proven its skill to forecast the inflow volume, maximum inflow discharge and number of days with discharge above mean annual maximum as satisfactory. The results of operational scheme testing during the freshet event of 2017 are presented. Prospects for improving the forecast skill by assimilating the observations of inflow and snow water content in the model are discussed.

**Keywords:** long-term hydrological forecasting, hydrological modelling, reservoir inflow forecasts, Cheboksary reservoir.

УДК 551.577.46:551.501.777(470+571)

## МОНИТОРИНГ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**О.Н. Булыгина, Н.Н. Коршунова, В.Н. Разуваев**

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, г. Обнинск  
bulygina@meteo.ru, nnk@meteo.ru, razuvaev@meteo.ru*

Описана технология мониторинга состояния снежного покрова России, разработанная и действующая в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Приведены оценки региональных изменений основных характеристик снежного покрова с учетом информации за 2016 год.

**Ключевые слова:** мониторинг, снежный покров, квазиоднородные климатические районы, региональные особенности, маршрутные снегосъемки, высота снежного покрова, запас воды в снеге.

### Введение

Значительные изменения климата, произошедшие в последние десятилетия, и возросшая зависимость различных отраслей экономики от этих изменений вызвали необходимость более тщательного слежения (мониторинга) за различными составляющими климатической системы. Основные задачи мониторинга сформулированы во Всемирной климатической программе [3], а основные требования к системе мониторинга определены в [4].

Снежный покров является важнейшим параметром климатической системы: благодаря высокой отражательной способности и низкой теплопроводности он играет важную роль в энергетическом балансе Земли, а накапливаемый в снежном покрове запас воды – в водном балансе.

Мониторинг характеристик снежного покрова проводится во многих странах. А для территории России, большая часть которой продолжительное время покрыта снегом, снежный покров играет одну из главных ролей в формировании климата. В [8] ежегодно помещаются результаты глобального анализа изменений характеристик снежного покрова. Созданная в России подсистема мониторинга снежного покрова выявляет и изучает региональные особенности в изменении характеристик снежного покрова. Методика официально утверждена решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 5 ноября 2013 года: ([method.meteorf.ru/cmkp/nov13.html](http://method.meteorf.ru/cmkp/nov13.html)). Результатам анализа состояния снежного покрова на территории России посвящен третий раздел ежегодного «Доклада об особенностях климата на территории

Российской Федерации» [2], который является официальным изданием Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

### **Информационная база**

База данных мониторинга состояния снежного покрова (БД «СНЕГ») подразделяется на исторические ряды, оперативные данные и нормативные характеристики. Исторические ряды характеристик снежного покрова сформированы в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» Росгидромета на основе данных Госфонда гидрометеорологической информации. Оперативные данные поступают по каналам связи в виде телеграмм «СИН ОП».

Основные требования к базовым сетям для мониторинга климата сформулированы в рамках Глобальной системы наблюдений за климатом [6, 7]. Мониторинг снежного покрова на территории России проводится по данным 958 метеорологических станций. Все эти метеорологические станции отнесены к типу незащищенных. По данным ежедневных наблюдений сформированы ряды данных о высоте снежного покрова и степени покрытия снегом окрестностей станции. По данным маршрутных снегомерных съемок сформированы ряды данных о влагозапасе и плотности снежного покрова. Из 958 станций на 665 проводятся наблюдения в поле, на 425 – в лесу (на 122 станциях осуществляются наблюдения и в поле, и в лесу). Поскольку методика наблюдений за характеристиками снежного покрова неоднократно изменялась [5], в информационную базу данных для мониторинга состояния снежного покрова включены данные за период с 1966 года. Состояние снежного покрова описывается за период с июля прошлого года по июнь текущего.

В состав информационной базы входят следующие нормативные характеристики по метеостанциям:

- среднемноголетнее значение (за период 1961–1990 гг.) числа дней с покрытием снегом более 50 % территории вокруг метеостанции (по месяцам и за год);
- среднемноголетние даты появления первого снега (за период 1961–1990 гг.);
- среднемноголетние даты образования устойчивого снежного покрова (за период 1961–1990 гг.);
- среднемноголетние значения (за период 1961–1990 гг.) максимальной высоты снежного покрова (по месяцам и за год);
- среднемноголетние значения (за период 1971–2000 гг.) максимального запаса воды в снеге (за год).

Согласно действующим рекомендациям ВМО, норма климатического параметра рассчитывается как среднее значение за 30-летний период. В настоящее время базовым считается период 1961–1990 гг.

В состав информационной базы также включены массивы временных рядов осредненных по всей территории России и по территории квазиоднородных климатических регионов характеристик:

- аномалии максимальной за зимний период высоты снежного покрова;
- аномалий числа дней со снегом;
- аномалий максимального за зимний период запаса воды в снеге.

Осреднение по площади выполнено как взвешенное осреднение станционных аномалий климатических переменных с весами, учитывающими плотность сети в окрестности станции. Аномалии на метеостанциях арифметически осреднялись по квадратам сетки ( $1^\circ \text{ N} \times 2^\circ \text{ E}$ ), а затем с весовыми коэффициентами в зависимости от широты квадрата проводилось осреднение по регионам, показанным на рисунке, и территории России. Выбор девяти квазиоднородных климатических регионов осуществлен на основании классификации Алисова [1].

Все массивы базы данных мониторинга состояния снежного покрова хранятся в форматах ASCII

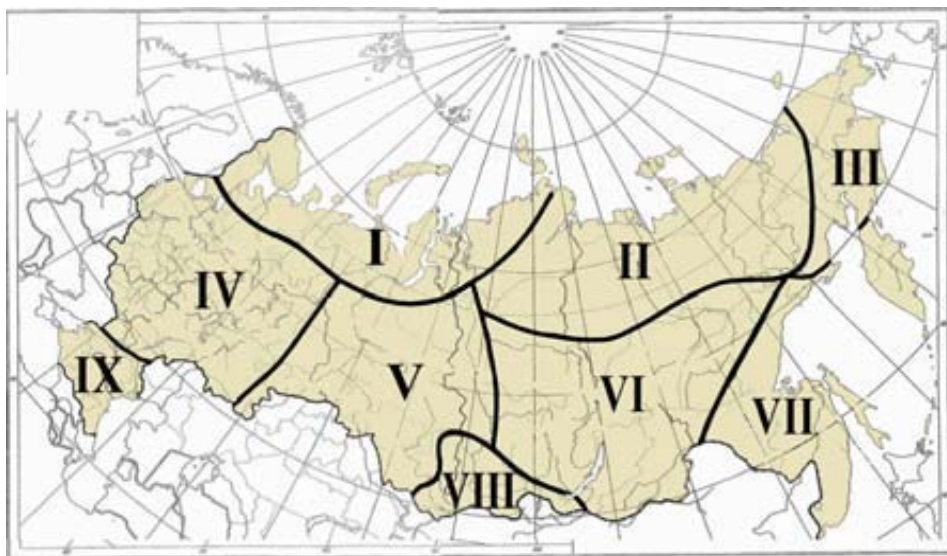


**Рис.** Квазиоднородные климатические регионы: I – Север ЕЧР и Западной Сибири; II – Северная часть Восточной Сибири и Якутии; III – Чукотка и север Камчатки; IV – Центр ЕЧР; V – Центр и юг Западной Сибири; VI – Центр и юг Восточной Сибири; VII – Дальний Восток, VIII – Алтай и Саяны, IX – Юг ЕЧР.

### Технология мониторинга снежного покрова

Для описания состояния снежного покрова используются следующие характеристики:

- число дней с покрытием снегом более 50 % территории вокруг метеостанции по данным ежедневных наблюдений (для оценки продолжительности залегания снежного покрова);

- дата появления первого снега;
- дата образования устойчивого снежного покрова;
- максимальная за зимний сезон высота снежного покрова;
- запас воды в снеге по данным маршрутных снегосъемок.

Технология мониторинга климата включает следующие основные этапы:

- ☐ Усвоение станционных данных суточного разрешения и данных маршрутных снегосъемок.
- ☐ Пополнение БД «СНЕГ» данными текущего года:
  - пополнение базовых массивов (ряды ежедневных данных о высоте снежного покрова и степени покрытия снегом окрестностей станции; ряды данных о влагозапасе и плотности снежного покрова по маршрутным снегосъемкам);
  - расчет производных характеристик (максимальной за зимний период высоты снежного покрова; числа дней со снегом, максимального за зимний период запаса воды в снеге);
  - расчет аномалий (максимальной за зимний период высоты снежного покрова; числа дней со снегом, максимального за зимний период запаса воды в снеге, даты появления первого снега и даты образования устойчивого снежного покрова).
- ☐ Расчет регионально осредненных временных рядов (аномалии и ранги).
- ☐ Расчет обновленных статистик (на станциях и по регионам), включая оценки трендов.
- ☐ Расчет характеристик влагозапаса по бассейнам крупных рек и водохранилищ Российской Федерации по состоянию на 20 марта текущего года (в сравнении с нормой и с влагозапасами предыдущего года).
- ☐ Подготовка иллюстративных материалов годового бюллетеня (в соответствии с принятым регламентом выходной продукции).
- ☐ Анализ материалов и подготовка раздела «Состояние снежного покрова РФ».

Программные средства, разработанные во ВНИИГМИ-МЦД в среде SAS, обеспечивают пополнение базовых массивов данными текущего года и расчет всех производных массивов станционных значений – месячной и годовой максимальной высоты снежного покрова; числа дней со снегом, максимального за зимний период запаса воды в снеге, аномалий (на станциях), даты появления первого снега и даты образования устойчивого снежного покрова. Устойчивым снежный покров считается в тех случаях, когда он лежит непрерывно в течение всей зимы или с перерывами не более 3 дней в течение каждых 30 дней залегания снега. Если весной, не более чем через 3 дня после схода покрова, вновь образуется покров и лежит не менее 10 дней, то считается, что залегание непрерывно. Если таких перерывов было 2 или 3, то все они включаются в устойчивый покров.

Аномалия климатической переменной (максимальной за зимний период высоты снежного покрова; числа дней со снегом, максимального за

зимний период запаса воды в снеге, даты появления первого снега и даты образования устойчивого снежного покрова) определяется как отклонение от климатической нормы и рассчитывается по формуле:

$$\Delta X_y = X_y - X_{norm}.$$

Здесь  $\Delta X_y$  – значение искомой аномалии в году  $y$ ;  $X_y$  – значение климатической переменной  $X$  в году  $y$ ;  $X_{norm}$  – норма климатической переменной (среднемноголетнее значение за тридцатилетний период).

Для получения осредненных по площади значений климатических переменных рассматриваются следующие масштабы горизонтального обобщения:

- территория Российской Федерации;
- квазиоднородные климатические регионы России.

Ввиду географической неоднородности средних величин климатических переменных и при наличии пропусков во временных рядах наблюдений пространственное осреднение проводится по данным об аномалиях соответствующей переменной. При необходимости региональные средние самой климатической переменной получают восстановлением из регионально осредненных аномалий и регионально осредненных норм. Область анализа (территория России, регион) покрывается сетью широтно-долготных квадрантов – «боксов» (ячеек сетки), и осреднение производится в два этапа: сначала усредняются станционные значения внутри каждого бокса, после чего полученные ячейечные средние усредняются между боксами с учетом весовых коэффициентов.

Для всех климатических переменных (станционных и пространственно осредненных) рассчитываются обновленные статистики, включая оценки трендов. Комплект статистических характеристик включает число случаев (лет), среднее, стандартное отклонение, минимум, максимум и оценки линейной аппроксимации, полученные методом наименьших квадратов, включая коэффициенты уравнения (свободный член и коэффициент линейного тренда).

В состав материалов мониторинга состояния снежного покрова входит иллюстративный материал (карты, графики, таблицы) и подготовленный на его основе текст, содержащий анализ текущих климатических аномалий и наблюдаемых изменений в режиме снежного покрова. Карты в действующей технологии готовятся с использованием пакета программ *MAPINFO* в регулярной азимутальной стереографической проекции. Используется стандартный IDW-метод пространственной интерполяции с коэффициентами обратно пропорциональными квадрату расстояния. При подготовке сложных рисунков используются готовые шаблоны, подготовленные в *Adobe Photoshop*, обеспечивающие достаточный уровень автоматизации.

## Результаты

В качестве результатов работы технологии мониторинга снежного покрова рассмотрим анализ состояния снежного покрова на территории Российской Федерации зимой 2015–2016 гг.

**Первый снег** зимой 2015/2016 гг. на Европейской территории выпал позже среднеклиматических сроков на 10–20 дней в западных и южных областях, в восточных областях и на Урале – на 2–10 дней раньше. На Азиатской территории России раньше обычных сроков снег появился на большей части Западной Сибири, за исключением крайних северных районов, Новосибирской области и Алтайского края. В Тыве временное установление снежного покрова наблюдалось уже в первых числах октября. В северных и северо-восточных районах АТР из-за теплого октября первый снег выпал позже климатических сроков. Более позднее появление первого снега отмечалось также на большей части Забайкалья, южных районов Красноярского края, в Амурской области. Сошел снег на большей части страны раньше средних многолетних сроков из-за аномально теплых марта и апреля.

**Продолжительность залегания снежного покрова** в среднем по России была на 2,68 дня меньше, чем климатическая норма (табл. 1). Максимальные положительные аномалии отмечены на Алтае и в Саянах (VIII регион).

**Таблица 1.** Средние за зимний период (2015/2016 гг.) аномалии характеристик снежного покрова, осредненные по территории квазиоднородных климатических регионов России

| Регион                                   | Максимальная высота |           |          | Число дней со снегом |           |          |
|------------------------------------------|---------------------|-----------|----------|----------------------|-----------|----------|
|                                          | $\Delta$            | R         | $\sigma$ | $\Delta$             | R         | $\sigma$ |
| Россия                                   | 1,98                | 22        | 3,08     | -2,68                | 35        | 4,99     |
| Север ЕТР и Западной Сибири              | 1,27                | 21        | 7,88     | -14,93               | <b>42</b> | 9,65     |
| Северная часть Восточной Сибири и Якутии | 5,01                | <b>6</b>  | 4,77     | 0,09                 | 20        | 7,79     |
| Чукотка и север Камчатки                 | -5,74               | 38        | 9,91     | -17,85               | <b>45</b> | 10,84    |
| Центр ЕТР                                | 0,41                | 27        | 6,75     | -5,72                | 31        | 10,22    |
| Центр и юг Западной Сибири               | 6,41                | <b>8</b>  | 6,85     | -0,28                | 24        | 8,29     |
| Центр и юг Восточной Сибири              | 4,08                | 11        | 6,20     | 0,85                 | 27        | 6,06     |
| Дальний Восток                           | -3,11               | <b>42</b> | 7,91     | -3,29                | 36        | 6,99     |
| Алтай и Саяны                            | 8,98                | <b>8</b>  | 6,91     | 6,69                 | 15        | 9,55     |
| Юг ЕТР                                   | 1,09                | 20        | 4,51     | -12,48               | 40        | 22,13    |

*Примечание:*  $\Delta$  – отклонения от средних за 1971–2000 гг.; R – ранг текущих значений в ряду убывающих характеристик зимнего периода за 1967–2016 гг.;

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение. Жирным шрифтом выделены аномалии, попавшие в 10 самых больших положительных или отрицательных значений за зимы 1967–2016 гг.

Максимальные отрицательные аномалии продолжительности залегания снежного покрова отмечены на севере Западной Сибири, в северо-восточных районах Якутии и на Чукотке, и обусловлены они именно поздним установлением снежного покрова в этих районах. А отрицательные аномалии продолжительности залегания снежного покрова в северных и северо-западных областях ЕТР обусловлены более ранним сходом снежного покрова. При региональном осреднении максимальные отрицательные аномалии получены в I и III регионах, они вошли в 10 самых больших отрицательных аномалий за период с 1967 по 2016 год.

В зимний период 2015/2016 гг. максимальная высота снежного покрова в среднем по России близка к климатической норме, аномалия составила 1,98 см при величине стандартного отклонения 3,08 см (табл. 1). Однако в отдельных регионах наблюдались значительные аномалии максимальной за зиму высоты снежного покрова обоих знаков. На Европейской территории максимальная высота снежного покрова значительно превысила норму в центральных и восточных областях. На ряде станций Свердловской и Челябинской областей, Ханты-Мансийского АО (Златоуст, Ивдель, Березово, Саранпауль) были превышены абсолютные максимумы высоты снежного покрова.

На АТР значительные положительные аномалии максимальной высоты снежного покрова отмечены на большей части Западной Сибири, в южных районах Красноярского края, в Тыве, в отдельных областях Якутии и Чукотского АО. На отдельных станциях в этих регионах (Килеер, Ишим, Неожиданный, Киренск, Алдан) зафиксирована максимальная за период наблюдений высота снега. Отрицательные аномалии максимальной высоты снежного покрова получены только для двух регионов – III и VII. Очень снежным в Западной Сибири выдался декабрь 2015 года. Особенно сильные снегопады наблюдались в Тюменской области и Алтайском крае, где выпало более 2,5–3-месячных норм осадков.

Максимальный за прошедшую зиму запас воды в снеге по данным маршрутных снегосъемок в среднем по России оказался значительно ниже нормы в лесу и близким к норме в поле (табл. 2). Максимальные положительные аномалии запаса воды в снеге в поле отмечены в тех же районах, где наблюдались наибольшие аномалии максимальной высоты снежного покрова (районы V, VI и VIII). В V и VIII районах значения максимального запаса воды в снеге на полевом маршруте попали в первую десятку наибольших значений. В лесу максимальный запас в снеге оказался гораздо ниже нормы во всех квазиоднородных районах, кроме центра и юга Восточной Сибири (район VI), Алтая и Саян (район VIII). Отрицательные аномалии запаса воды в снеге на обоих маршрутах отмечены на северо-западе ЕТР и Камчатке.

Многолетние изменения характеристик снежного покрова оценивались коэффициентами линейного тренда, характеризующими знак и среднюю скорость изменений максимальных за зимний период значений

высоты снежного покрова и числа дней со степенью покрытия окрестностей станции снегом более 50 % на интервале 1976–2016 гг., тренд выражен в см/10 лет и днях/10 лет соответственно.

**Таблица 2.** Аномалии максимального за зимний период (2015–2016 гг.) запаса воды в снеге, осредненные по территории квазиоднородных климатических регионов России

| Регион                                   | Запас воды в снеге (поле) |          |          | Запас воды в снеге (лес) |           |          |
|------------------------------------------|---------------------------|----------|----------|--------------------------|-----------|----------|
|                                          | $\Delta$                  | R        | $\sigma$ | $\Delta$                 | R         | $\sigma$ |
| Россия                                   | 0,33                      | 23       | 8,49     | -22,22                   | 37        | 14,86    |
| Север ЕТР и Западной Сибири              | -19,14                    | 40       | 16,72    | -31,82                   | 38        | 25,4     |
| Северная часть Восточной Сибири и Якутии | -                         | -        | -        |                          |           |          |
| Чукотка и север Камчатки                 | -                         | -        | -        | -36,98                   | <b>47</b> | 26,69    |
| Центр ЕТР                                | -5,65                     | 34       | 17,9     | -17,52                   | <b>41</b> | 19,12    |
| Центр и юг Западной Сибири               | 18,59                     | <b>7</b> | 16,94    | -10,71                   | 26        | 23,06    |
| Центр и юг Восточной Сибири              | 0,81                      | 24       | 6,61     | 1,63                     | 20        | 8,15     |
| Дальний Восток                           | -4,38                     | 35       | 20,45    | -20,63                   | <b>43</b> | 24,99    |
| Алтай и Саяны                            | 20,72                     | <b>7</b> | 13,56    | 16,72                    | 13        | 29,91    |
| Юг ЕТР                                   | -3,23                     | 31       | 10,57    | -                        | -         | -        |

*Примечание:*  $\Delta$  – отклонения от средних за 1971–2000 гг.; R – ранг текущих значений в ряду убывающих характеристик зимнего периода за 1967–2016 гг.;

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение. Жирным шрифтом выделены аномалии, попавшие в 10 самых больших положительных или отрицательных значений за зимы 1967–2016 гг.

Как и в период 1976–2015 гг., наблюдается увеличение максимальной за зиму высоты снежного покрова на севере Западной Сибири, на побережье Охотского моря и дальневосточном юге, в центре ЕЧР, в Чукотском АО и на юге Камчатки. Уменьшение максимальной за зиму высоты снежного покрова наблюдается на отдельных станциях на севере ЕЧР, севере Камчатского края, северо-западе Республики Саха-Якутия. При осреднении по регионам, статистически значимые на 5%-ном уровне положительные коэффициенты линейного тренда получены как для России в целом, так и для большинства квазиоднородных районов, кроме I, II, III и IX (в табл. 3).

В период с 1976 по 2016 г. на значительной части страны обнаружена тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова: на большей части ЕЧР, на севере и юге Западной Сибири, Таймыре и северо-западе Республики Саха (Якутия). В среднем для России число дней со снегом сокращается на 1,01 дня за 10 лет (в табл. 3). Сохраняется тенденция увеличения числа дней со снежным покровом в Забайкалье, на северном побережье Охотского моря, на южном и центральном Урале.

Тенденции изменений максимального за зиму запаса воды в снеге с 1976 по 2016 г. по данным маршрутных наблюдений в поле остались практически такими же, как и за период 1976-2015 гг. Наблюдается увеличение в центральных районах ЕЧР, северных и южных районах Западной Сибири, на Камчатке, Сахалине и в Приморье. Средний для страны в целом запас воды в снеге по данным маршрутных снегосъемок в поле увеличивается на 1,84 мм за 10 лет. По данным маршрутных наблюдений в лесу на территории России преобладают тенденции уменьшения максимального за зиму запаса воды в снеге. В Прикамье, Восточной Сибири, на севере Якутии выделяются отдельные области с положительными значениями коэффициентов линейного тренда. Наиболее обширная зона положительных коэффициентов линейного тренда охватывает южные районы Хабаровского края, Приморье и Сахалин. При оценке региональных изменений получено, что на Дальнем Востоке (район VII) запас воды в снеге в лесу увеличивается более чем на 7 мм за 10 лет (табл. 1). В I, IV и V получены значимые отрицательные тренды запаса воды в снеге по данным снегосъемок по лесным маршрутам. И в целом по России запас воды в снеге в лесу уменьшается примерно на 2 мм за 10 лет.

**Таблица 3.** Оценки линейного тренда (статистически значимые на 5%-ном уровне значимости) регионально осредненных характеристик снежного покрова для регионов России за 1976–2016 гг.

| Регион                          | Hmax | Nd    | SWЕп | SWЕл  |
|---------------------------------|------|-------|------|-------|
| Россия                          | 1,92 | -1,01 | 1,84 | -1,99 |
| Север ЕТР и Западной Сибири     | -    | -     | -    | -6,50 |
| Север Восточной Сибири и Якутии | -    | -     | -    | -     |
| Чукотка и север Камчатки        | -    | -     | -    | -     |
| Центр ЕТР                       | 1,63 | -3,44 | -    | -6,52 |
| Центр и юг Западной Сибири      | 1,75 | -2,18 | -    | -6,02 |
| Центр и юг Восточной Сибири     | 1,14 | -     | -    | -     |
| Дальний Восток                  | 4,56 | -     | 8,89 | 7,60  |
| Алтай и Саяны                   | 1,67 | -     | 3,77 | -     |
| Юг ЕТР                          | -    | -     | -    | -     |

*Примечание:* Hmax – максимальная за зимний период высоты снежного покрова, см/10 лет; Nd – число дней со снежным покровом дни/10лет; SWЕп – запас воды в снеге (в поле), мм/10лет; SWЕл – запас воды в снеге (в лесу) мм/10лет.

## Выводы

Снежный покров играет важнейшую роль в формировании климата России. Созданная во ВНИИГМИ-МЦД технология мониторинга снежного покрова позволяет регулярно получать подробный анализ состояния снежного покрова на территории страны, оперативно отслеживать тенденции в изменении его характеристик. Результаты анализа помещаются в

ежегодный «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации», который является официальным изданием Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, и могут использоваться для долгосрочных гидрологических прогнозов и планирования в различных отраслях экономики.

*Поступила в редакцию 15.09.2017 г.*

#### Список использованных источников

1. Алисов Б.П. Климат СССР. М.: Московский Университет, 1956. 127 с.
2. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации в 2016 году. Глава 3. Снежный покров зимой 2015/2016 гг. М.: Росгидромет, 2017. С. 23-28.
3. Всемирная климатическая программа 1988-1997 гг. Второй долгосрочный план ВМО // ВМО-№ 692. 1987.
4. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Мониторинг и вероятностный прогноз короткопериодных колебаний климата // 60 лет центру гидрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 148-170.
5. Шакирзянов Р.И., Разуваев В.Н. Изменения в методиках наблюдения за состоянием снежного покрова на территории Российской Федерации // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2000. Вып. 167. С 41-51
6. GCOS, 2002: Guide to the GCOS surface and upper-air networks: GSN and Guan (version 1.1) GCOS -73 // WMO/TD-No. 1106. Geneva, September 2002.
7. Peterson T.C., Daan H., Jones P. Initial selection of a GCOS surface network // Bull. Am. Meteorol. Soc. Vol. 78. P. 2145-2152.
8. State of the Climate in 2014 // Bull. Amer. Meteor. Soc. Vol. 96(7). S201-S204.

#### SUMMARIES

**Monitoring snow cover on the territory of Russia** / Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 87-96.

Described is the technology of snow cover monitoring in Russia, which was developed and is operational now in the RIHMI-WDC. The regional changes of the basic characteristics of snow cover (including the data for the 2016) were estimated and are presented in the article.

**Keywords:** monitoring, snow cover, the quasi-homogeneous climatic regions, regional characteristics, route snow surveys, snow depth, water storage in the snow.

УДК 551.524.7:551.509.314

## МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЕТРА В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

*А.С. Лавров, А.В. Хохлова, А.М. Стерин*

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической  
информации – Мировой центр данных, г. Обнинск  
sterin@meteo.ru, annax77@yandex.ru*

Приведено описание методики и технологии мониторинга климатических параметров температуры и ветра в свободной атмосфере. Технология представляет собой комплекс, состоящий из массивов радиозондовых данных, собираемых, архивируемых и обрабатываемых в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», и пакета разработанных программных средств для обработки и представления результатов. Мониторинг режима температуры свободной атмосферы осуществляется в Северном полушарии по данным около 700 станций. Мониторинг ветра в свободной атмосфере осуществляется над территорией Российской Федерации по данным около 100 станций. Приведены результаты анализа особенностей климатических параметров температуры и ветра в свободной атмосфере за первую половину 2017 года.

*Ключевые слова:* климат, мониторинг климата, радиозондовые данные, программные средства, анализ данных, температура свободной атмосферы, ветер, тропосфера, нижняя стратосфера, аномалии, климатические тренды.

### Введение

Задачами климатического мониторинга является оценка состояния и изменений компонент климатической системы. Основные понятия, касающиеся климатического мониторинга, введены и уточнены в ряде работ, в том числе в [4, 5, 6] и других. Системы мониторинга различных параметров климатической системы существуют в различных международных организациях, агентствах и крупных центрах, причем мониторинг осуществляется как в глобальном, так и в региональном масштабе. Основное внимание при этом уделяется мониторингу характеристик приземного климата, прежде всего температуре воздуха, облачности, осадкам, засухам [3, 12, 13].

Вместе с тем, свободная атмосфера является не менее важной частью климатической системы, и мониторинг ее параметров также представляет собой актуальную задачу. Результаты оценки состояния и изменений существенных параметров климата атмосферы отражаются в Оценочных докладах МГЭИК [11]. В выпускаемых Росгидрометом ежегодных Докладах об особенностях климата предусмотрены разделы, касающиеся оценок для температуры и ветра в свободной атмосфере. Подготовка материалов

и написание этих разделов осуществляется в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», где на протяжении многих лет ведутся исследования температурного и ветрового режима тропосферы и нижней стратосферы [2, 8, 10].

К настоящему времени в результате этих исследований и накопленного опыта обработки и анализа больших массивов данных разработана методика мониторинга температуры свободной атмосферы над Северным полушарием, а также пробная версия методики мониторинга режима ветра в свободной атмосфере над территорией Российской Федерации. Методики основаны на многолетних аэрологических наблюдениях, собираемых и архивируемых во ВНИИГМИ-МЦД, и реализованы в виде программного комплекса, выполняющего обработку, всевозможные преобразования, анализ данных и представление результатов. Результаты мониторинга климатических параметров свободной атмосферы, помимо публикаций в ежегодном докладе Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации, предоставляются пользователям и используются в научных статьях и обзорах.

В статье приведено краткое описание разработанных методик и технологий мониторинга температуры и ветра в свободной атмосфере, а также некоторые результаты, полученные при анализе температурного и ветрового режима в свободной атмосфере за первую половину 2017 года.

## **1. Информационная база**

Исходные данные для мониторинга режима температуры представляют собой срочные данные радиозондирования, ранее собиравшиеся с каналов связи в Среднеазиатском региональном вычислительном центре (г. Ташкент), а ныне собираемые с каналов связи ВНИИГМИ-МЦД с глобальной сети аэрологических станций в архив АЭРОСТАС [7, 9]. В массивах накопленных исторических содержатся данные аэрологического зондирования с 1978 г. по текущее время по российским станциям и с 1984 г. по текущее время – по зарубежным станциям. Общее число станций, по которым ведется сбор аэрологических данных, превышает 900 и варьирует от месяца к месяцу (рис. 1).

В процессе формирования архивных файлов данные проходят процедуру комплексного контроля качества [1], после которого каждое значение метеопараметров сопровождается соответствующим флагом качества.

Мониторинг режима температуры свободной атмосферы осуществляется в Северном полушарии по данным около 700 станций. Мониторинг ветра в свободной атмосфере осуществляется над территорией Российской Федерации по данным около 100 станций (рис. 2).

## **2. Технология мониторинга**

Общая схема технологии мониторинга состоит из нескольких этапов:  
– обработка месячной порции поступивших данных радиозондирования по всей глобальной сети;

– получение статистических характеристик для каждой станции на стандартных изобарических поверхностях за многолетний месяц, сезон или год (эти данные используются в качестве норм при последующей оценке аномалий для конкретного года);

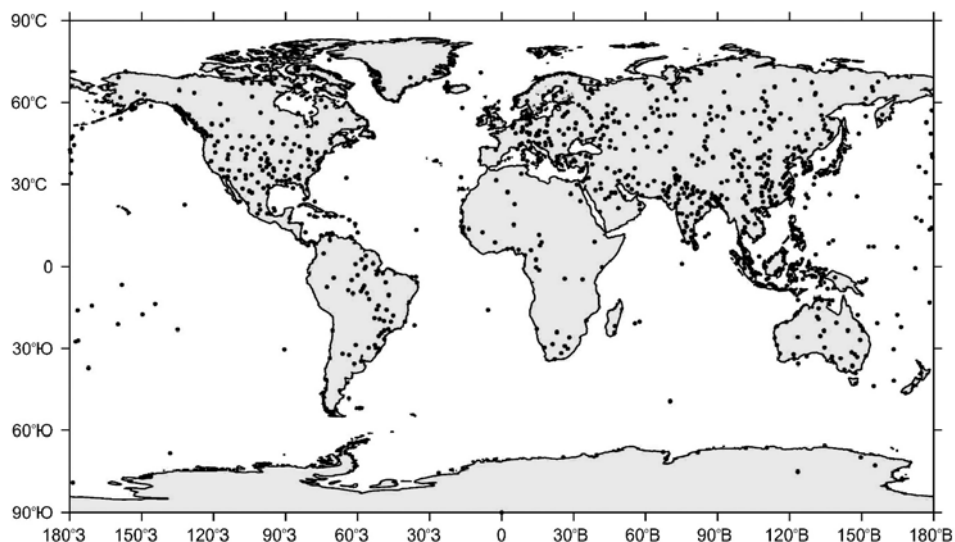


**Рис. 1.** Географическое распределение станций радиозондирования, данные которых собираются во ВНИИГМИ-МЦД.

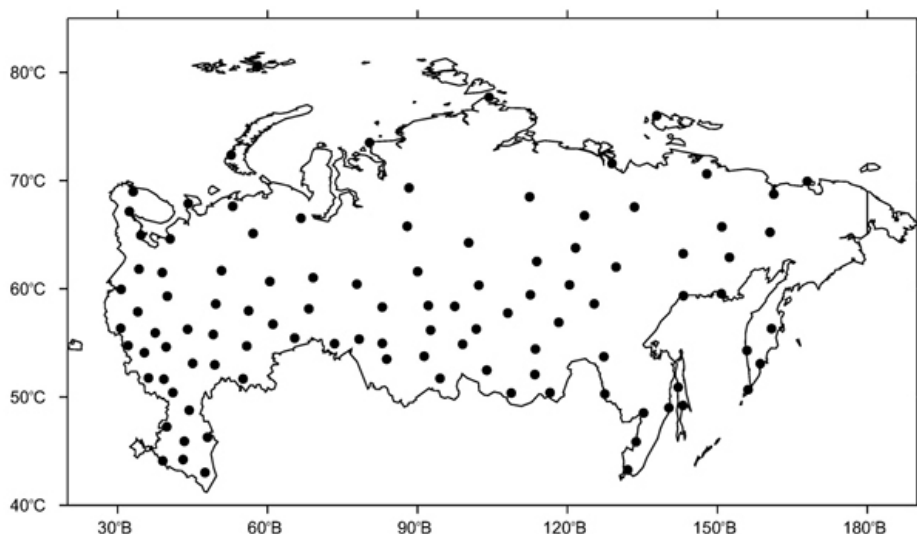


**Рис. 2.** Географическое распределение станций радиозондирования, данные которых используются для мониторинга ветра в свободной атмосфере.

- получение тех же характеристик за соответствующий месяц или сезон конкретного анализируемого года;
- расчет аномалий по отдельным станциям;
- пространственное обобщение результатов расчета аномалий для отдельных станций;
- расчет трендов и других характеристик;
- анализ особенностей анализируемого года;
- представление результатов.

Все расчеты и анализ ведутся с использованием программного обеспечения SAS (см., например, [https://www.sas.com/ru\\_ru/software/analytic](https://www.sas.com/ru_ru/software/analytic)), а для картографического представления результатов используется пакет IDL ([https://www.harrisgeospatial.com/docs/idl\\_programming.html](https://www.harrisgeospatial.com/docs/idl_programming.html)).

Ниже приведено более детальное описание особенностей схем для мониторинга температурного и ветрового режима.

## 2.1. Обработка и обобщение данных

Срочные данные радиозондирования в архиве АЭРОСТАС после прохождения процедуры контроля качества сопровождаются флагами качества. При обработке и обобщении данных для мониторинга температуры и ветра свободной атмосферы используются только данные, имеющие флаги качества: «правильное значение», «исправленное значение», «восстановленное значение».

На основе собранных месячных порций данных срочных наблюдений рассчитывается массив постанционных статистических характеристик различных метеовеличин в свободной атмосфере, в который входят температура, скорость и направление ветра, величины зонального и меридионального ветра. Значения характеристик выбираются на 15 изобарических поверхностях (1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 гПа). В дополнение к значениям характеристик на изобарических поверхностях на основе взвешенного вертикального обобщения рассчитываются значения характеристик в основных слоях атмосферы: 850–300 гПа (тропосфера), 100–50 гПа (нижняя стратосфера), 300–100 гПа (переходный слой, характеризующийся значительной нестабильностью). Обобщение выполняется по формуле:

$$x = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^n \frac{x_i - x_{i-1}}{2} (z_i - z_{i-1}),$$

где  $z$  – высота слоя;  $n$  – количество обобщаемых изобарических уровней;  $x_i$  – значение характеристики на  $i$ -м изобарическом уровне;  $z_i$  –  $i$ -й изобарический уровень.

На основных изобарических поверхностях и в слоях для каждой станции вычисляются аномалии температуры и скорости ветра, а также аномалии зональной и меридиональной составляющих скорости ветра. В качестве норм, относительно которых считаются аномалии, используются

соответствующие характеристики температуры и скорости ветра для этой станции, осредненные за период 1981–2010 гг. для температуры и 1985–2014 гг. для ветра. Нормы и аномалии вычисляются для каждого месяца для каждой станции отдельно для сроков 00 и 12 ч ВСВ. После этого, в пределах месяца, вычисленные нормы и аномалии усредняются по срокам. При усреднениях используются веса, равные числу признанных при контроле качества корректными соответствующих срочных значений температуры и скорости ветра.

Поля температуры в свободной атмосфере имеют зональный характер, т. е. гладкость полей в значительной мере выражена в направлениях вдоль кругов широты. В связи с этим аномалии температуры в свободной атмосфере подвергаются взвешенному пространственному усреднению по пятиградусным и тридцатиградусным широтным поясам 0–30° с. ш., 30–60° с. ш., 60–90° с. ш., а также по всему Северному полушарию. В качестве весов используется косинус географической широты станции. Оценки скорости и аномалии скорости ветра пространственному усреднению не подвергаются.

Помимо пространственного усреднения постанционных месячных аномалий температуры, проводится усреднение аномалий температуры и характеристик ветра по сезонам и по году в целом. При этом зимний сезон начинается с декабря года, предшествующего исследуемому, а оценки года в целом охватывают период январь – декабрь.

## 2.2. Температурный режим в свободной атмосфере

Для тридцатиградусных широтных зон и Северного полушария в целом проводится анализ оценок аномалий температуры на основных изобарических поверхностях для каждого из 12 месяцев исследуемого года, анализ оценок аномалий температуры в слое тропосферы (850–300 гПа) и нижней стратосферы (100–50 гПа) для каждого из четырех сезонов исследуемого года и года в целом, а также анализ рангов, которые имеют аномалии температуры исследуемого года в рядах соответствующих аномалий начиная с 1958 года.

В дополнение к этому осуществляется расчет оценок линейных трендов сезонных и годовых аномалий температуры тропосферы и нижней стратосферы за период начиная с 1958 года с последующим анализом полученных оценок, включающим в себя анализ коэффициентов линейных трендов, оценку статистической значимости линейных трендов и оценку объясненной линейной моделью дисперсии.

По усредненным данным на пятиградусных широтных зонах проводится анализ вертикально-широтной структуры годовых и сезонных аномалий температуры свободной атмосферы в исследуемом году.

Соответствующие результаты представляются графически: строятся графики аномалий с наложенными графиками трендов, диаграммы для сопоставления наиболее значительных положительных аномалий для

температуры тропосферы и отрицательных аномалий для температуры нижней стратосферы. Также строятся вертикально-широтные сечения значений аномалий для анализируемого года (по Северному полушарию).

### **2.3. Ветровой режим в свободной атмосфере**

Анализ оценок ветрового режима осуществляется путем построения изолиний на карте Российской Федерации. В него входит построение изолиний средней скорости ветра с указанием среднего направления ветра на отдельных станциях для каждого из 12 месяцев и каждого из четырех сезонов. Направление ветра определяется по оценкам средней зональной и меридиональной составляющих скорости ветра и представляет собой направление результирующего вектора.

Помимо построения изолиний средней скорости ветра, для всех 12 месяцев и четырех сезонов строятся изолинии аномалий скорости ветра с указанием аномалий направления ветра на отдельных станциях путем построения результирующего вектора за исследуемый период и результирующего вектора за период 1985–2014 гг.

В последующем разделе приведены образцы табличного и графического материала, который подготавливается в процессе мониторинга параметров свободной атмосферы. Для этого проведен анализ соответствующих данных для зимнего сезона 2016–2017 гг. и весеннего сезона 2017 г. и описаны особенности режима для этих двух сезонов.

## **3. Особенности температурного и ветрового режима в свободной атмосфере в первой половине 2017 года**

### **3.1. Особенности температурного режима**

Первая половина 2017 года характеризуется существенными различиями значений и даже знаков аномалий температуры свободной атмосферы как от месяца к месяцу, так и по вертикали. В табл. 1 приведены значения аномалий температуры за первые шесть месяцев 2017 года для двух широтных зон Северного полушария (30–60° с. ш. и 60–90° с. ш.) для отдельных изобарических поверхностей: 850, 500, 300 и 100 гПа. В умеренных широтах в тропосфере наблюдались исключительно положительные аномалии. Максимальные аномалии наблюдались в феврале и марте в нижней тропосфере (до 1,57 °С). В марте и апреле в верхней тропосфере значения аномалий были близки к нулю. При этом в нижней стратосфере наблюдались большие отрицательные аномалии, достигающие -1,65 °С в апреле. В высоких широтах в тропосфере преобладали положительные аномалии. Максимальные аномалии наблюдались в феврале и марте, достигая 1,74 °С. В апреле и июне в верхней тропосфере наблюдались отрицательные аномалии, а май стал единственным месяцем, в котором отрицательные аномалии наблюдались на всех высотах. В нижней стратосфере все месяцы характеризовались отрицательными аномалиями температуры.

**Таблица 1.** Аномалии температуры за 2017 год для двух широтных зон Северного полушария на отдельных изобарических поверхностях

| Месяц   | 30–60° с. ш. |         |         |         | 60–90° с. ш. |         |         |         |
|---------|--------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
|         | 850 гПа      | 500 гПа | 300 гПа | 100 гПа | 850 гПа      | 500 гПа | 300 гПа | 100 гПа |
| Январь  | 0,46         | 0,18    | 0,44    | -0,90   | 0,68         | 0,40    | 0,48    | -0,33   |
| Февраль | 1,57         | 1,28    | 0,68    | -1,06   | 1,24         | 1,22    | 0,38    | -0,36   |
| Март    | 1,26         | 0,63    | 0,06    | -1,51   | 1,74         | 0,74    | 0,48    | -0,65   |
| Апрель  | 0,74         | 0,56    | 0,02    | -1,65   | 0,28         | -0,59   | -0,80   | -0,44   |
| Май     | 0,67         | 0,51    | 0,27    | -0,83   | -0,50        | -0,80   | -0,73   | -0,38   |
| Июнь    | 0,57         | 0,58    | 0,50    | -0,62   | 0,51         | 0,17    | -0,79   | -0,60   |

В табл. 2 представлены сезонные аномалии температуры в тропосфере и стратосфере для всех тридцатиградусных широтных зон и для Северного полушария в целом, а также ранги аномалий в рядах самых теплых и самых холодных лет соответственно. В тропосфере 2017 год стал вторым самым теплым годом зимой в нижних широтах и Северном полушарии с аномалиями 0,71 и 0,68 °С соответственно. В средних широтах он вошел в пятерку самых теплых лет и зимой и весной, а в высоких широтах не попал даже в десятку самых теплых лет. Весенняя аномалия температуры в высоких широтах вообще близка к нулю с отрицательным знаком (-0,03 °С).

**Таблица 2.** Сезонные аномалии температуры от норм 1981–2010 гг.

| Сезон                                 | 0–30° с. ш. |    | 30–60° с. ш. |   | 60–90° с. ш. |    | Северное полушарие |   |
|---------------------------------------|-------------|----|--------------|---|--------------|----|--------------------|---|
|                                       | ΔТ          | R  | ΔТ           | R | ΔТ           | R  | ΔТ                 | R |
| <b>Тропосфера, 850–300 гПа</b>        |             |    |              |   |              |    |                    |   |
| Зима                                  | 0,71        | 2  | 0,70         | 4 | 0,32         | 14 | 0,68               | 2 |
| Весна                                 | 0,27        | 11 | 0,59         | 5 | -0,03        | 28 | 0,44               | 5 |
| <b>Нижняя стратосфера, 100–50 гПа</b> |             |    |              |   |              |    |                    |   |
| Зима                                  | -2,29       | 1  | -1,37        | 3 | -0,42        | 24 | -1,61              | 1 |
| Весна                                 | -1,33       | 3  | -1,19        | 4 | -0,73        | 11 | -1,20              | 2 |

*Примечание:* ΔТ – величина аномалии в градусах Цельсия; R – ранг в рядах упорядоченных по возрастанию (для тропосферы) и убыванию (для стратосферы) значений соответствующих аномалий за период 1958–2017 гг.

В нижней стратосфере 2017 г. стал самым холодным годом в нижних широтах и Северном полушарии зимой (-2,29 и -1,61 °С соответственно), а весной – вторым самым холодным годом в Северном полушарии (-1,20 °С). Кроме того, весна в нижних широтах и зима в средних широтах заняли третье место в ряду самых холодных лет в нижней стратосфере.

В высоких широтах ни зима, ни весна не попали даже в десятку самых холодных лет. Подробная вертикально-широтная структура представлена на рис. 3.

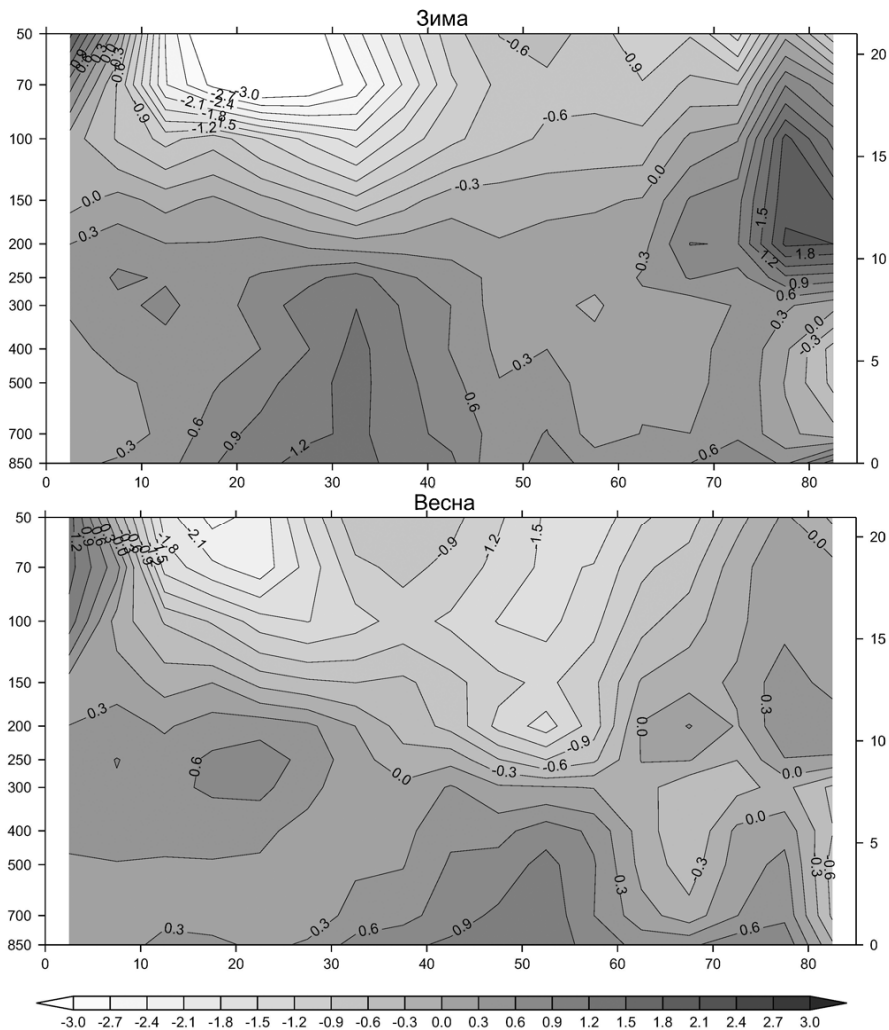


**Рис. 3.** Вертикально-широтная структура сезонных аномалий температуры свободной атмосферы в 2017 г. Горизонтальная ось – широты, левая вертикальная ось – давление на стандартных изобарических поверхностях, правая вертикальная ось – высоты над уровнем моря в км.

Ни рис. 4 продемонстрированы ряды сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1981–2017 гг., а на рис. 5 – ряды самых теплых лет в тропосфере и самых холодных лет в нижней стратосфере. По ним видно, что зима 2017 г. в тропосфере уступает только зиме 2016 г. Зимняя аномалия 2017 г. в нижней стратосфере

более чем на  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  превосходит предыдущий рекорд 2013 г., а весна незначительно уступает 1999 году.

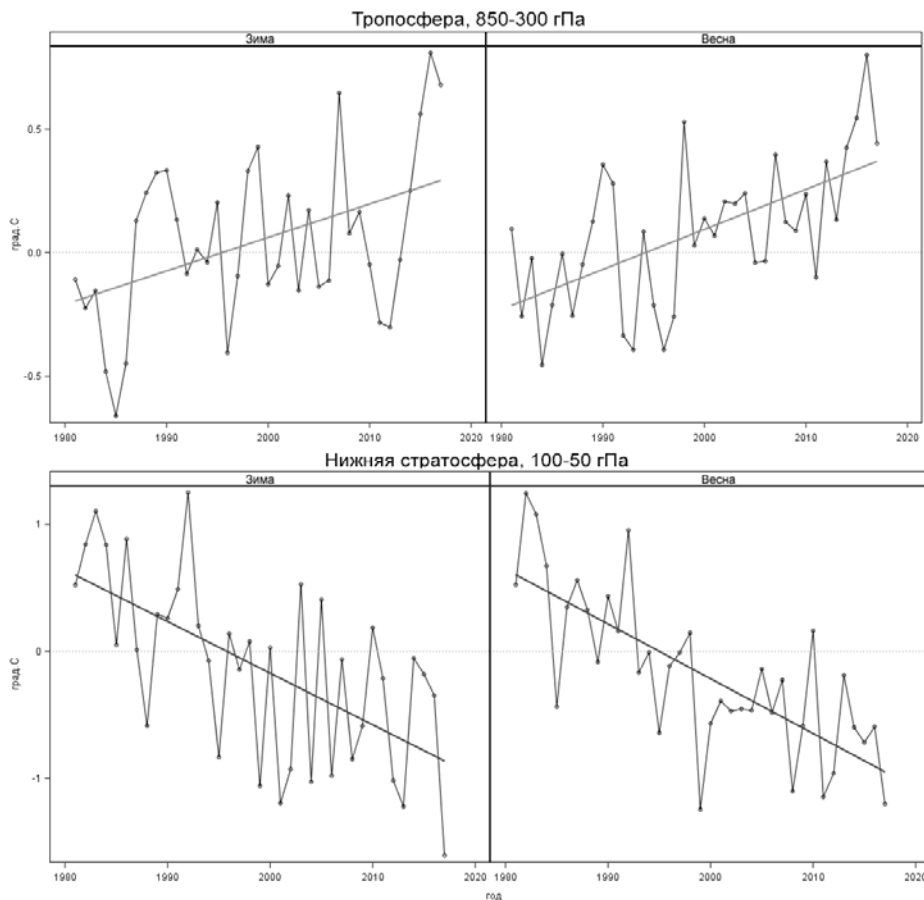


**Рис. 4.** Ряды сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1981–2017 гг. Линии трендов построены методом наименьших квадратов.

В табл. 3 содержатся значения линейных трендов сезонных аномалий отдельных широтных зон и Северного полушария в целом для тропосферы и нижней стратосферы за период 1981–2017 гг. Добавление 2017 г. в исследуемый период привело к увеличению абсолютных значений трендов по сравнению с 2016 г. во всех сезонах на всех широтных зонах, за исключением обоих сезонов в высоких широтах тропосферы, весны в нижних широтах и Северном полушарии тропосферы, а также весны в высоких широтах нижней стратосферы. Значение весеннего тренда в высоких широтах тропосферы даже уменьшилось на  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  по сравнению с 2016 годом.

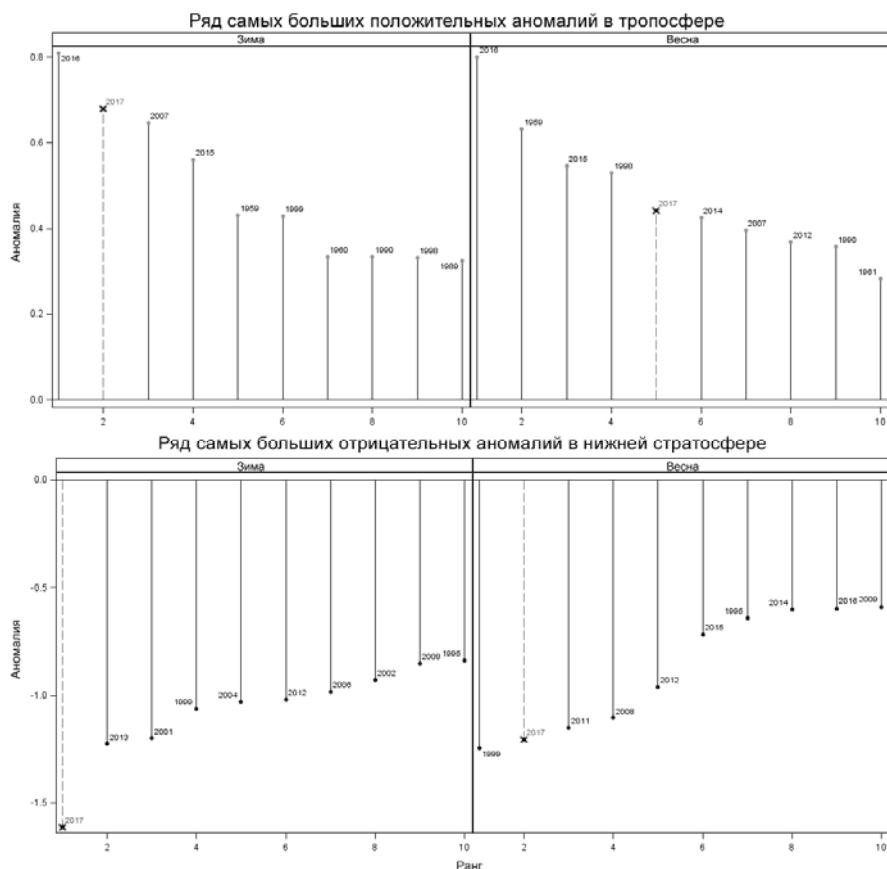


**Рис. 5.** Ряды самых значительных сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1958–2017 гг.

**Таблица 3.** Сезонные оценки линейного тренда температуры

| Сезон                                 | 0–30° с. ш.  |           | 30–60° с. ш. |           | 60–90° с. ш. |           | Северное полушарие |           |
|---------------------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------------|-----------|
|                                       | b            | D         | b            | D         | b            | D         | b                  | D         |
| <b>Тропосфера, 850–300 гПа</b>        |              |           |              |           |              |           |                    |           |
| Зима                                  | <b>0,18</b>  | <b>28</b> | 0,11         | 7         | <b>0,16</b>  | <b>22</b> | <b>0,14</b>        | <b>19</b> |
| Весна                                 | 0,09         | 10        | <b>0,20</b>  | <b>35</b> | <b>0,17</b>  | <b>16</b> | <b>0,16</b>        | <b>36</b> |
| <b>Нижняя стратосфера, 100–50 гПа</b> |              |           |              |           |              |           |                    |           |
| Зима                                  | <b>-0,66</b> | <b>45</b> | <b>-0,33</b> | <b>19</b> | -0,08        | 0         | <b>-0,41</b>       | <b>38</b> |
| Весна                                 | <b>-0,55</b> | <b>53</b> | <b>-0,38</b> | <b>38</b> | <b>-0,35</b> | <b>11</b> | <b>-0,43</b>       | <b>55</b> |

*Примечание:* b – значения тренда, °C/10 лет; D – объясненная линейным трендом доля общей дисперсии ряда, %. Жирным шрифтом выделены значения трендов, статистически значимо отличные от нуля с вероятностью не менее 0,95.

### 3.2. Особенности ветрового режима

Среднесезонные скорости ветра над территорией Российской Федерации в 2017 г. в нижней стратосфере и тропосфере изображены на рис. 6 и 7 соответственно. В нижней стратосфере и зимой, и весной области максимальной средней скорости наблюдались на юге Сибири, где они достигали 27,3 и 19 м/с соответственно. Зимой минимальная средняя скорость наблюдалась на севере Сибири, а весной область минимального среднего ветра проходила через всю Восточную Сибирь. В обоих сезонах минимальная скорость не превышала 10,8 м/с. Направление ветра над большей частью Российской Федерации преобладало западное, только на северо-востоке Дальнего Востока зимой наблюдалось юго-западное направление, а весной – почти повсеместно – южное.

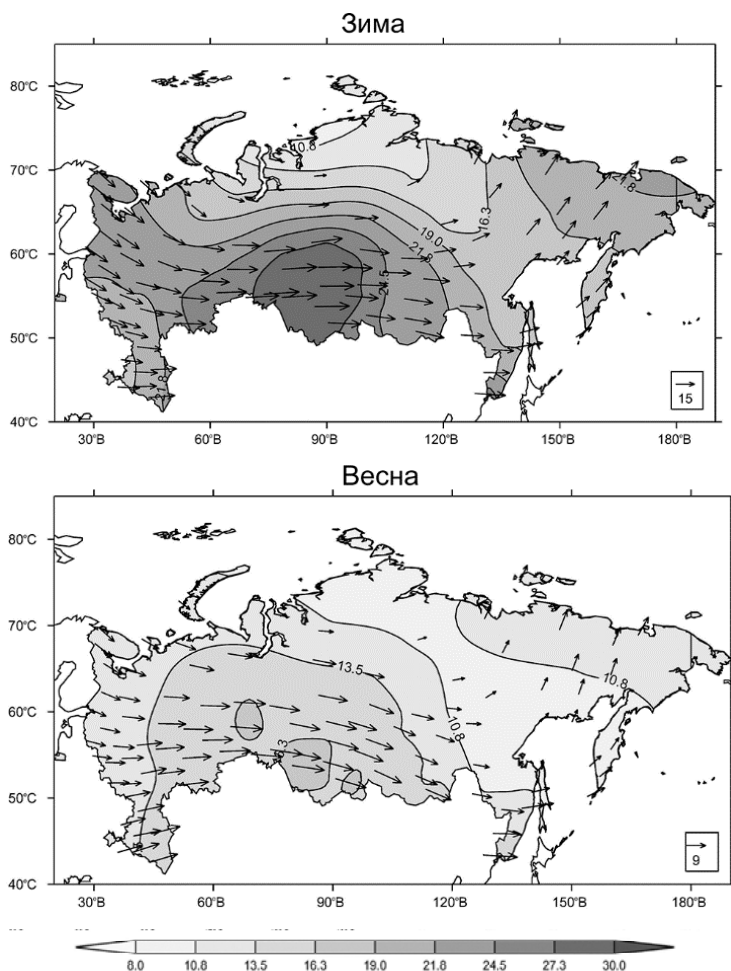


**Рис. 6.** Средняя скорость и направление ветра зимой и весной в нижней стратосфере в 2017 г.

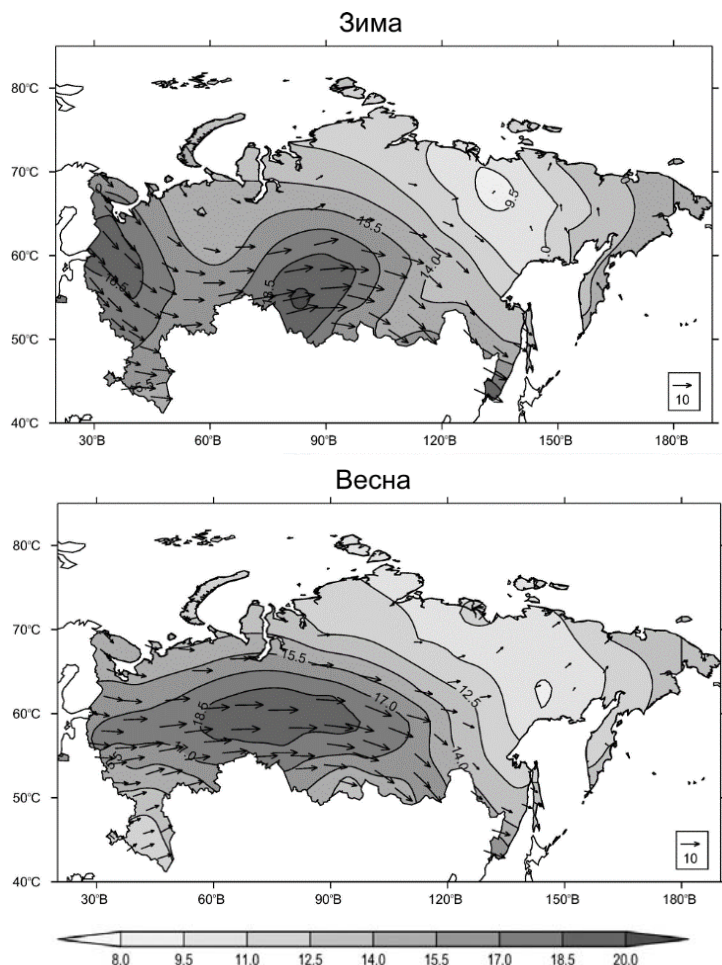


**Рис. 7.** Средняя скорость и направление ветра зимой и весной в тропосфере в 2017 г.

В тропосфере зимой наблюдалось две области максимального среднего ветра: на северо-западе европейской части России и на юге Сибири. Весной область максимального среднего ветра протянулась с запада европейской части России на Западную Сибирь. В обоих сезонах скорость ветра достигала 20 м/с. Наименьшая скорость ветра и зимой, и весной наблюдалась на востоке Восточной Сибири и не превышала 9,5 м/с. Направление ветра зимой преобладало северо-западное на северо-западе европейской части России и западное на остальной части европейской России и в Западной Сибири. Весной на европейской части России и в Западной Сибири преобладал западный ветер, а на Дальнем Востоке зимой и летом сильно выраженного направления ветра не наблюдалось.

На рис. 8 изображены сезонные аномалии скорости и направления ветра в нижней стратосфере и тропосфере.

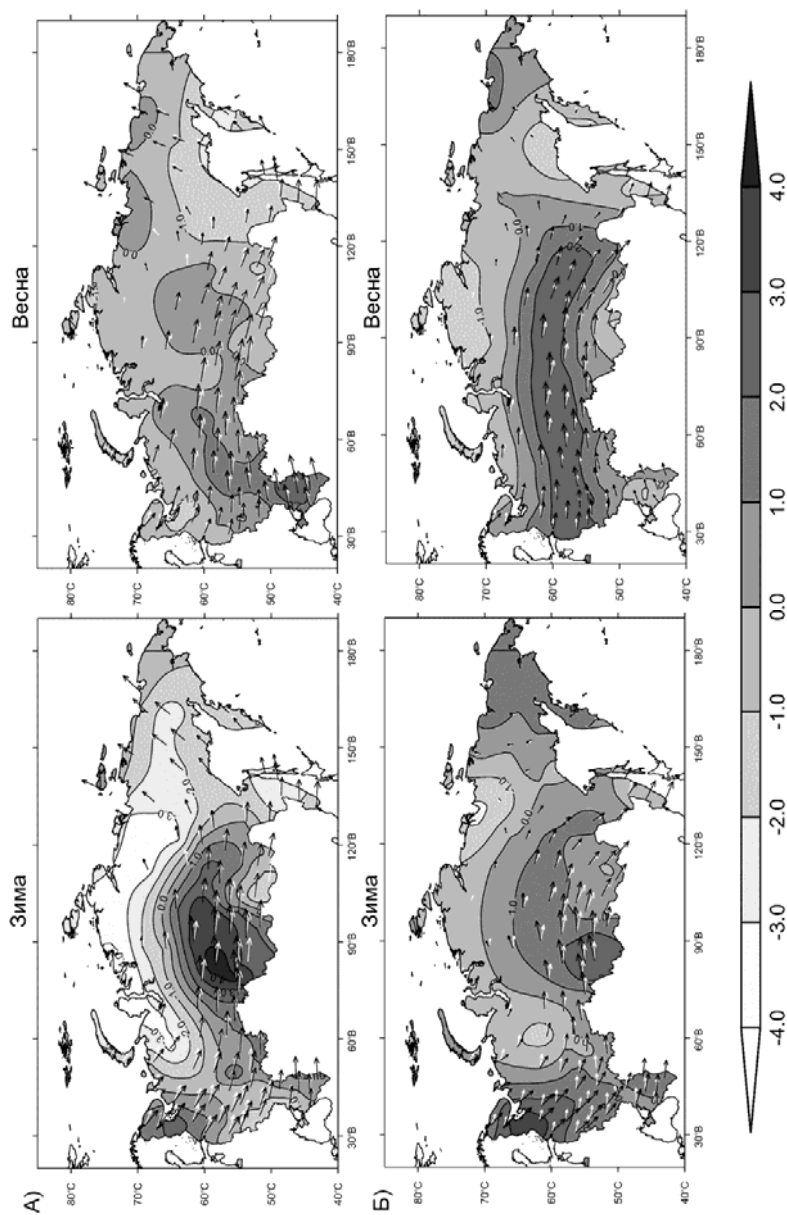


**Рис. 8.** Аномалии средней скорости и направления ветра зимой и весной в нижней стратосфере (а) и тропосфере (б) в 2017 г. Черные стрелки указывают среднее направление ветра в 2017 г., белые – за период 1985–2014 гг.

В нижней стратосфере зимой на юге Сибири наблюдались высокие положительные аномалии скорости ветра, превышающие 4 м/с. Также положительные аномалии наблюдались на северо-западе европейской части России. Над остальной территорией Российской Федерации наблюдались высокие отрицательные аномалии с максимумом, превышающим -4 м/с, находящимся в Заполярье. Весной преобладали аномалии, близкие к нулю. Максимум положительных аномалий наблюдался на юге России, а отрицательных – на Дальнем Востоке. Ни зимой, ни весной не наблюдалось сильных аномалий направления ветра, только на северо-западе европейской части России зимой были небольшие отрицательные аномалии меридионального ветра.

В тропосфере зимой небольшие отрицательные аномалии наблюдались только на западе европейской части России и на севере Сибири. Максимумы положительных аномалий (до 4 м/с) наблюдались на северо-западе европейской части России и на юге Сибири. В европейской части России наблюдались сильные отрицательные аномалии меридионального ветра, а на юге Сибири – небольшие положительные аномалии. Весной положительные аномалии, достигающие 3 м/с, наблюдались вдоль всей территории Российской Федерации в широтах 50–65° с. ш. вплоть до Дальнего Востока. В этих же широтах наблюдались сильные положительные аномалии зонального ветра.

### Заключение

Разработанная и реализованная технология позволяет осуществлять мониторинг климатических параметров температуры и ветра в свободной атмосфере, проводить оценку особенностей текущего года и отдельных его сезонов и оценивать общие тенденции изменения этих характеристик. В дальнейшем предполагается расширение перечня климатических характеристик свободной атмосферы для мониторинга и анализа, а также развитие технологии мониторинга ветра, а именно мониторинг ветра для всего Северного полушария.

*Поступила в редакцию 15.09.2017 г.*

### Список использованных источников

1. Алдухов О.А., Черных И.В. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 1. Контроль качества и обработка данных. Обнинск: ВНИИ-ГМИ-МЦД, 2013. 306 с.
2. Алдухов О.А., Черных И.В. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 3. Влажность и температура в атмосфере: статистические характеристики. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2015. 494 с.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 18-235.
4. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50-66.
5. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. Особенности темпера-

турного режима у поверхности Земли в январе – июне 2016 года // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 2. С. 119-142.

6. Израэль Ю.А., Анохин Ю.А., Груза Г.В., Иванов В.Н., Егоров В.И., Крученицкий Г. М., Савченко А.В., Петров Н.Н. Разработка и некоторые результаты функционирования системы мониторинга основных климатообразующих факторов в средней атмосфере // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 7. С. 5-14.

7. Казначеева В.Д., Руденкова Т.В. Организация текущих аэрологических данных на магнитных лентах ЕС // *Труды ВНИИ-ГМИ-МЦД*. 1985. Вып. 115. С. 91-108.

8. Лавров А.С., Стерин А.М. Результаты сопоставления рядов температуры свободной атмосферы по данным радиозондовых и спутниковых наблюдений // *Метеорология и гидрология*. 2017: № 2. С. 30-44.

9. Руденкова Т.В. Формат архивации текущих аэрологических данных, поступающих по каналам связи для ПЭВМ // *Труды ВНИИГМИ-МЦД*. 2010. Вып. 174. С. 41-63.

10. Хохлова А.В., Тимофеев А.А. Многолетние изменения ветрового режима в свободной атмосфере над европейской территорией России // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 4. С. 21-33.

11. IPCC 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.) Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2013.

12. Trenberth K.E. et al. Challenges of a sustained climate observing system. *Climate Science for Deriving Society: Research, Modeling and Prediction Priorities* / G.R. Asrar, J.W. Hurrell (eds) Springer, 2013. P. 13-50.

13. Zuev S.V., Tikhomirov A.A. Cloudiness monitoring for database of local weather // *Proc. SPIE 6160, Twelfth Joint International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics*, 61600U (21 April 2006); doi: 10.1117/12.675238; <http://dx.doi.org/10.1117/12.675238>

## SUMMARIES

**Monitoring of climate parameters of temperature and wind in the free atmosphere: technological aspects** / Lavrov A.S., Khokhlova A.V., Sterin A.M. // *Proceedings of Hydrometcentre of Russia*. 2017. Vol. 366. P. 97-111.

Procedure and technology of the monitoring of climate parameters of temperature and wind in the free atmosphere are described. The technology represents a complex that consists of (1) radiosonde data sets that are collected, archived and processed in the RIHMI-WDC and (2) software packages for processing and presentation of results. Temperature regime monitoring in the free atmosphere is implemented in the northern hemisphere based on the data from about 700 stations. Wind monitoring in the free atmosphere is implemented over the Russian Federation area by using data from about 100 stations. The results of the analysis of specific features of temperature and wind climate parameters in the free atmosphere are presented for the first half of 2017.

**Keywords:** climate, climate monitoring, radiosonde data, software, data analysis, free atmosphere temperature, wind, troposphere, lower stratosphere, anomalies, climate trends.

УДК 551 (510.53:590.21:510.4)

## **ОСОБЕННОСТИ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В РЕГИОНЕ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

***Р.Д. Гайнутдинова, Д.Н. Крымская***

*Институт физико-технических проблем и материаловедения  
Национальной академии наук Кыргызской Республики,  
Кыргызская Республика, Бишкек  
epfk@rambler.ru*

В целях выделения физически значимых частотных и временных компонентов для последующего анализа, рассматриваются возможности использования вейвлет-преобразования в качестве инструмента для анализа многолетних рядов данных приземной температуры атмосферы и солнечной активности над Кыргызстаном.

*Ключевые слова:* атмосфера, температура, солнечная активность, климат, спектральный анализ.

### **Введение**

Для получения информации о периодических процессах в вариациях параметров климатических параметров обычно применяется спектральный анализ временных рядов. При анализе результатов исследований важное значение имеет правильный выбор методов обработки экспериментального материала.

На основе спектрального анализа временных рядов был исследован частотный состав многолетних вариаций приземной температуры и исследованы закономерности изменения параметров термического режима атмосферы в регионе Кыргызстана В [1] были исследованы фоновые колебания и трендовые составляющие многолетних рядов температуры нижней атмосферы для зимнего и летнего сезонов.

Изучение региональных особенностей временных изменений температуры приземной атмосферы за длительный период времени начиная с 1930 года по настоящее время имеет важное значение, поскольку они отражают климатические изменения температурного режима над Кыргызстаном, в том числе и над частью Центральноазиатского региона [1].

В последние годы показано, что глобальные климатические изменения складываются из региональных изменений. Особенно важно, что часто региональные климатические параметры на относительно коротком

периоде времени имеют противоположные знаки. При этом региональные особенности оказывают решающее влияние на перераспределение потоков тепла в рамках общеизвестных законов, обусловленных меняющимся положением Земли относительно Солнца. Таким образом, изучение региональных особенностей изменения температурного режима приземной и нижней атмосферы над частью Центральноазиатского региона имеет важное значение. Данная работа посвящена характеристикам изменчивости региональных долгопериодных вариаций температурного режима над Кыргызстаном.

### **Методы анализа экспериментальных данных**

При анализе статистических рядов метеорологических параметров используются различные математические аппараты. Для выявления скрытых периодичностей ранее широко использовался спектральный анализ разложения временных рядов – метод Блекмана и Тьюки, впоследствии широкое распространение получил более точный метод максимальной энтропии [2].

В последние годы более широкое распространение получило вейвлет-преобразование временных рядов различных параметров [3]. В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование имеет самонастраивающееся подвижное частотно-временное окно и хорошо выявляет как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах. Этот метод дает двумерную развертку исследуемого сигнала, где масштаб (частота) и время считаются независимыми переменными.

В вейвлет-анализе используются быстро спадающие солитоноподобные функции. Это позволяет проводить локализованный анализ структуры сигналов, что особенно важно при изучении процессов с меняющимися во времени характеристиками. Преимущество вейвлет-анализа перед другими методами заключается в быстром Фурье-анализе без осреднения выделяемых частот по всему ряду с детальным, микроскопическим анализом на скейлограммах как в длинноволновой, так и короткопериодной части спектра.

Вейвлет-анализ применяется для изучения сложных природных динамических систем и процессов, протекающих в них. Он широко применяется при анализе геофизических, радиофизических и биомедицинских данных, для которых методы Фурье-анализа оказываются недостаточно информативными [4].

В Фурье-анализе это связано прежде всего с соотношением неопределенностей анализируемых параметров, которое заключается в том, что не может быть одновременно достигнуто хорошее разрешение по времени и по частоте. Другим недостатком Фурье-анализа, связанным с соотношением неопределенностей, является то, что он неустойчив к малым возмущениям: незначительная ошибка в одном из коэффициентов спектрального разложения приводит к перестройке всего сигнала во времени.

Вейвлет-преобразование строится на основе единственной базисной функции, имеющей солитоноподобный характер. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье, вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности температурных изменений. Одно из главных преимуществ этого метода заключается в том, что он дает достоверные результаты при анализе нестационарных рядов, какими являются ряды приземной температуры на интервалах более 26–30 лет. Помимо этого он дает двумерную развертку одномерного процесса, когда частота  $\omega$  и время  $t$  – независимые переменные, что позволяет анализировать сигнал сразу в двух пространствах:

$$\varphi(t) = e^{-\beta t} e^{-j\omega t} = e^{-\beta t} (\cos \omega t - j \sin \omega t),$$

где  $\varphi$  – значение вейвлет-функции,  $\omega$  – волновой параметр,  $\beta$  – вейвлет-коэффициент.

Для анализа данных температурных рядов использовался непрерывный вейвлет-анализ, вейвлет Морле, позволяющий детально проанализировать на скейлограммах весь временной спектр частот – от высоких частот более мелкого масштаба до низкочастотных колебаний, имеющих более крупный масштаб. Непрерывное вейвлет-преобразование помимо целочисленных масштабов выделяет дробные масштабы.

### Результаты экспериментальных расчетов

Рассмотрим временные изменения среднесуточных и среднемесячных вариаций температуры приземной атмосферы по данным метеостанций (МС) Бишкек (760 м над у.м.), МС Нарын (2040 м над у.м.) и МС Тянь-Шань (3700 м над у.м.) за период регулярных наблюдений с 1930 по 2008 год. Расположение станций на высотах от 700 до 3700 м дает возможность исследовать периодические процессы на разных уровнях атмосферы. Анализ этих данных показал, что по данным МС Бишкек начиная с 1930 г. среднегодовая температура на высоте 760 м повысилась от 9,5 до 12 °С в 2006 году. По данным МС Нарын на высоте 2040 м также отмечается непрерывный рост температуры от 1,5 до 4,5 °С за тот же период времени. Особо выделяется высота 3700 м, где по данным МС Тянь-Шань температура с 1930 по 2006 г. возросла от -8,5 до -6,5 °С. Если по МС Бишкек и Нарын за 75-летний период произошло повышение температуры на  $\Delta T = 3$  °С, то на уровне МС Тянь-Шань за тот же период скорость потепления снизилась до  $\Delta T = 2$  °С.

Для анализа использовались аномалии среднегодовых температур  $\Delta T_i(t)$  за вычетом температурного тренда  $T_{mp}$ , вычисленного методом наименьших квадратов. Далее рассмотрим более детально периодические колебания в температурных вариациях методом разложения используя метод Фурье-преобразования [3]. Результаты спектрального анализа временных вариаций температуры в нижней атмосфере представлены на рис. 1. По оси абсцисс период указан в годах.

Рассматривая периодические колебания температуры, можно выделить в них основную частотную составляющую с периодом около 30–32 лет. При этом основная 11-летняя периодичность не просматривается и никак не связана с существующими экстремумами в вариациях колебаний температуры. Анализ этих данных за холодное полугодие показал, что основная периодичность в колебаниях температуры в этот период составляет 26–28 лет.

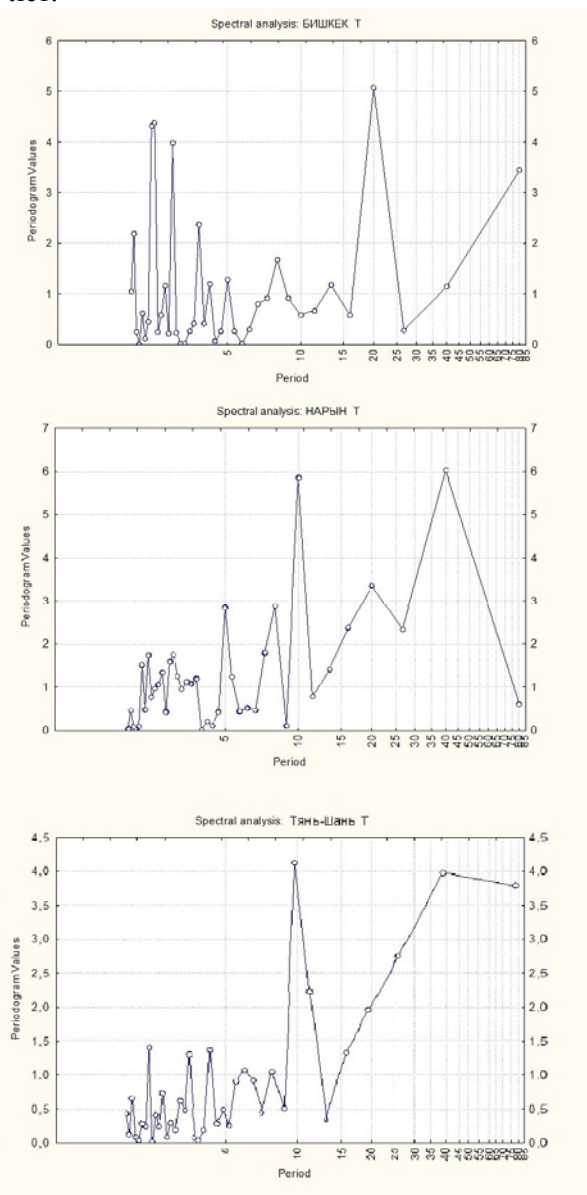


**Рис. 1.** Результаты спектрального анализа временных вариаций температуры в нижней атмосфере (МС Бишкек, Нарын и Тянь-Шань).

В табл. 1 приведены результаты спектрального анализа, примененного к временным рядам приземной среднегодовой температуры воздуха по данным МС Бишкек, Нарын и Тянь-Шань.

**Таблица 1.** Периодические составляющие в вариациях приземной среднегодовой температуры воздуха по данным МС Бишкек, Нарын и Тянь-Шань

| Станция   | Периоды (годы) |     |     |     |     |     |       |       |       |       |       |
|-----------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 0,5-1          | 1-2 | 3-4 | 4-5 | 6-7 | 8-9 | 10-12 | 13-14 | 20-25 | 30-40 | 80-90 |
| Тянь-Шань | 1,0            | 2,0 | 3,5 | 4-5 | 6,5 | 8,5 | 11,0  | -     | 22,0  | 34-38 | 85-90 |
| Нарын     | 1,0            | 2,0 | 3,5 | 5,0 | 6,5 | 8,5 | 11,0  | -     | 22,0  | 40,0  | -     |
| Бишкек    | 1,0            | 2,0 | 3,5 | 5,0 | 7,0 | 8,5 | 12,0  | 13,0  | 22,0  | -     | 85-90 |

Анализ рис. 1 и табл. 1 показывает, что составляющие с периодами от одного года и до 11 лет присутствуют во временных рядах температуры на всех трех высотных уровнях атмосферы: 760, 2040 и 3700 м. Амплитуда одних и тех же частот, выделенных на разных уровнях, различна. Составляющая с периодом в 11 лет наиболее четко проявляется на более верхних уровнях атмосферы. На уровне атмосферы 760 м она менее выражена, поскольку этот слой слишком «зашумлен» техногенными факторами, здесь же наиболее четко выделяются годовая и квазидвухлетняя составляющие.

Далее выделяется 22-летняя составляющая, которая по амплитуде является основной периодичностью в солнечных циклах. Она наиболее четко проявляется в нижних слоях атмосферы (в приземном слое – МС Бишкек и Нарын). На верхних уровнях (МС Тянь-Шань) она менее выражена и представлена в виде возрастающего тренда.

Другой особенностью частотного спектра на верхних уровнях нижней атмосферы является ярко выраженная 34–38-летняя составляющая, она присутствует на уровнях МС Нарын и Тянь-Шань, в нижних слоях не отмечается.

Рассмотрим результаты вейвлет-преобразования, примененного к временным рядам параметра солнечной активности  $F_{10,7}$  и приземной среднегодовой температуры воздуха по данным МС Нарын (2040 м над у.м.) и Бишкек (760 м над у.м.). Были рассчитаны отклонения температуры от линейной регрессии  $\Delta T_i(t)$ , из которых исключен средний многолетний тренд по данным МС Нарын и Бишкек.

Для вейвлет-преобразования использовались аномалии среднегодовых температур  $\Delta T_i(t)$  за вычетом температурного тренда  $T_{mp}$ , вычисленного методом наименьших квадратов:

$$\Delta T_i(t) = T_i(t) - T_{mp}.$$

К этим рядам температур и солнечной активности было применено непрерывное вейвлет-преобразование.

На рис. 2 а–в приведены результаты расчетов частотного состава исходных рядов  $\Delta T_i(t)$  по данным МС Бишкек и Нарын, а также параметра солнечной активности  $F_{10,7}$ , выполненные методом непрерывного вейвлет-преобразования. Анализируемый ряд по МС Нарын охватывает 110-летний период измерений температуры начиная с 1897 года, по Бишкеку – с 1927 года по настоящее время.

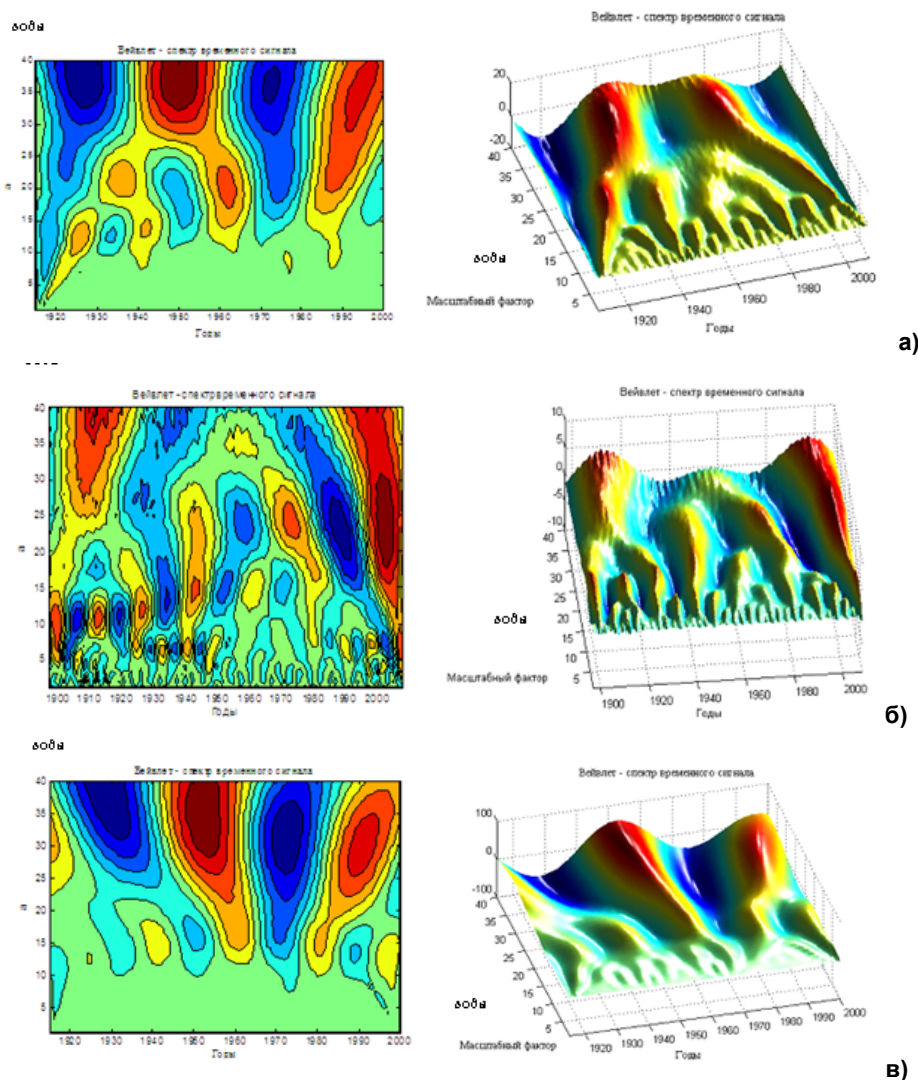


**Рис. 2.** Скейлограммы вейвлет-преобразования рядов температуры по данным МС Бишкек (а) и Нарын (б) и параметра солнечной активности  $F_{10,7}$  (в).

Из полученных частотных составляющих выделены общие периодичности, присутствующие одновременно в этих рядах и определяемые с уровнем доверительной вероятности  $P \geq 0,95$ , с периодами 11–12 лет, 20–22 года, 35–40 лет, 50–55 лет и 90–95 лет.

Анализ скейлограмм вейвлет-преобразования этих данных показывает, что в вариациях температуры с вероятностью  $P > 0,87$  выделяются пики, соответствующие периодам 2,8–3,0; 5,0–5,5; 8,0; 11–12; 16–18; 21–23; 25–27; 35–37; 40–43; 49–52; 85–95. Подобные периодические составляющие выделены и в вариациях температурных аномалий по данным как МС Нарын, так и МС Бишкек. Практически те же периодичности выделяются и в спектрах вариаций солнечной активности. По данным анализа параметров солнечной активности в Главной геофизической обсерватории были выделены такие же периодические составляющие. Коэффициент корреляции между ними больше 0,5 и является статистически значимым.

Из рис. 2 а–в видно, что основная часть спектра представлена периодами от 11-летних до 40-летних колебаний. Особенностью результатов, полученных с помощью вейвлет-преобразований этих данных, является изменение амплитуды выделенных периодичностей вдоль всего рассматриваемого ряда.

Эти результаты свидетельствуют о реальной связи вариаций температуры с вариациями солнечной активности над средне- и высокогорьем Кыргызстана, расположенного в центральной части Центральноазиатского региона.

В последующем к выделенным периодичностям было применено разложение Фурье с переменным ядром преобразования для определения амплитуд и фаз выделенных составляющих. В табл. 2 приведены периоды и амплитуды выделенных данным методом периодических составляющих и их повторяемость по данным МС Нарын за 110 лет. Выделенные периоды соответствуют фазам максимума амплитуды. Курсивом отмечены годы предполагаемых максимумов в будущем.

Ошибка определения амплитуды для уровня доверительной вероятности  $P \geq 0,95$  для среднегодовых значений составляет  $\pm 0,16$  °С, а для холодного полугодия –  $\pm 0,3$  °С. В табл. 2 для холодного периода приведены выделенные те составляющие, амплитуды которых превышают 0,5 °С.

Для долгосрочного прогноза температуры (среднегодовых и за холодное полугодие) можно взять 4–6 диапазонов периодов: 8,0–8,5; 11–12; 20–22; 35–36; 50–55; 90–95 лет. На основе этих значимых периодичностей можно составить долгосрочный прогноз изменения среднегодовых и среднесезонных температур для холодного полугодия. Полученные долгопериодные составляющие отражают реальные процессы, протекающие в атмосфере, и могут быть положены в основу эмпирического моделирования температурного режима нижней атмосферы [5, 6].

Эти результаты свидетельствуют о реальной связи вариаций температуры с вариациями солнечной активности над средне- и высокогорьем Кыргызстана, расположенного в центральной части Центральноазиатского региона.

На основе имеющихся данных о частотном спектре долгопериодных вариаций приземной температуры можно смоделировать вероятные изменения температуры с учетом 22, 35, 50 и 90-летней составляющей.

**Таблица 2.** Результаты Фурье-анализа многолетних температурных рядов по данным МС Нарын: периоды и амплитуды периодических составляющих

| Среднегодовые температуры                 |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|-------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Период, годы                              | 8,0-8,5      | 11-12        | 16-18        | 20-22        | 23-25        | 28-30        | 35-36        | 50-52        | 90-95        |
| Амплитуда, °С                             | 0,50         | 0,55         | 0,42         | 0,53         | 0,37         | 0,40         | 0,45         | 0,37         | 0,87         |
| Годы максимума амплитуды                  |              |              | 1990<br>2005 | 2000<br>2020 | 1990<br>2015 | 1970<br>2002 | 1970<br>2005 | 1965<br>2015 | 1992<br>2085 |
| Средние температуры за холодное полугодие |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Период, годы                              | 8,0-8,5      | 11-12        | 16-18        | 20-22        | 23-25        | 28-30        | 35-36        | 50-52        | 90-95        |
| Амплитуда, °С                             | 0,86         | 0,50         | 0,69         | 0,69         | 0,91         | 0,61         | 0,65         | 0,78         | 1,43         |
| Годы максимума амплитуды                  | 2001<br>2009 | 1998<br>2010 | 2005<br>2020 | 2005<br>2025 | 1987<br>2012 | 2003<br>2032 | 2002<br>2038 | 1995<br>2045 | 1993<br>2088 |

### Заключение

Проведенные исследования показали возможность использования вейвлет-преобразования в качестве инструмента для анализа многолетних рядов данных температуры атмосферы и океана в целях выделения практически значимых частотных и временных компонентов для последующего анализа.

Методом спектрального анализа временных рядов получены периодические составляющие многолетних вариаций температуры по метеостанциям Бишкек, Нарын и Тянь-Шань за период с 1930 по 2008 год.

На верхних уровнях нижней атмосферы наиболее четко выделена составляющая с периодом в 11 лет, связанная с 11-летним циклом солнечной активности. Особенностью частотного спектра температурных вариаций на верхних уровнях нижней атмосферы является ярко выраженная 34–38-летняя составляющая.

В приземном слое атмосферы выделены сезонные (годовые) и квазидвухлетние составляющие. В нижних слоях атмосферы выделена квазидвадцатилетняя составляющая, которая связана с основным 22-летним солнечным циклом. Выделенные периодические составляющие связаны с солнечной активностью и реально существующими долгопериодными процессами, протекающими в атмосфере.

Полученные данные свидетельствуют о связи температурного режима нижней атмосферы с циклами солнечной активности и могут быть использованы в долгосрочном прогнозе температурного режима атмосферы над Кыргызстаном и Центральноазиатским регионом.

*Поступила в редакцию 10.10.2017 г.*

## Список использованных источников

1. *Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д.* Изменения регионального климата, обусловленные природными и антропогенными факторами // *Экология Кыргызстана: проблемы, прогнозы, рекомендации* / под ред. проф. К.А. Каримова. Бишкек: Илим, 2000. С. 66-81.
2. *Цветков А.В.* Результаты анализа данных градиента потенциала методом максимальной энтропии // *Труды ГГО*. 1981. Вып. 458. С. 43-48.
3. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеров применения // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145-1170.
4. *Гармаев Б.З.* Вейвлет-анализ локальной структуры пульсовых сигналов: автореферат дис. ... канд. ф.-мат. наук: 01.04.03. ИГУ, Иркутск, 2013.
5. *Karimov K.A., Gainutdinova R.D.* Impact of solar activity on regional climate change in mounteneous conditions of Central Asia // *Proceedings of International Conference «Influence of global climate change on the ecosystem of arid and high mountain zone in CA»*. Dushanbe, Tajikistan, 2012. P. 70-73.
6. *Karimov K.A., Gainutdinova R.D.* Regional climate change in Kyrgyzstan: Impact of natural and anthropogeneous factors // *Proceedings of NATO ARW on Climate Change and its Effects on Water Resources / Issues of National and Global Security*. The Netherlands, Springer Science+BusinessMedia, 2011. P. 131-137.

## SUMMARIES

**The peculiarities of frequency spectra of long-term changes of surface temperature and parameters of solar activity in the Kyrgyz Republic region / Gainutdinova R.D., Krymskaya D.N.** // *Proceedings of Hydrometcentre of Russia*. 2017. Vol. 366. P. 112-120.

The possibilities of using wavelet analysis as an instrument for analyzing long-term data on atmospheric temperature and solar activity in the Kyrgyz Republic to define physically meaningful frequency and time components for further analysis are discussed.

*Keywords:* atmosphere, temperature, solar activity, climate, spectral analysis.

УДК 551 (510.53:590.21:510.4)

## **РОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

***К.А. Каримов, Р.Д. Гайнутдинова***

*Институт физико-технических проблем и материаловедения  
Национальной академии наук Кыргызской Республики,  
Кыргызская Республика, Бишкек  
karkaz@rambler.ru, epfk@rambler.ru*

Представлен анализ долгопериодных климатических изменений приземной температуры в Центральноазиатском регионе. Показано, что процесс похолодания в регионе начался в 2005 году. Полученная эмпирическая модель регионального изменения температурного режима нижней атмосферы в Центральной Азии свидетельствует о процессе похолодания в приземном слое атмосферы, обусловленном влиянием солнечной активности, определяющей температурный режим всего земного шара.

*Ключевые слова:* атмосфера, температура, солнечная активность, климат.

### **Введение**

Вопросам регионального климата и причинам его изменения в последние годы специалистами стало уделяться особое внимание. Эта проблема была одной из основных тем обсуждения на Международной научной конференции «Региональные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды», организованной Росгидрометом [11]. До этого вопрос о региональных проблемах изменения климата так широко практически не поднимался, обсуждались только вопросы, связанные с глобальным изменением климата и причинами его изменения [6].

В [4] показано, что в регионе Центральной Азии в последние 10 лет происходит медленный процесс похолодания. По европейской территории отмечается процесс небольшого потепления и даже его стабилизации после 2005 г. По данным [12], вклад парниковых газов в процесс потепления составляет 20–25 % и не является доминирующим фактором. Эта же идея была высказана еще в 2000 году, и было показано, что техногенный фактор не является доминирующим в изменении климата [5]. На этот факт также указывал академик РАН В.М. Котляков, который подчеркнул, что основную роль в изменении климата Земли играют изменения притока солнечной радиации на Землю, которая зависит от уровня солнечной активности и вариаций солнечной постоянной [3].

# 1. Влияние солнечной радиации, уровня солнечной активности и интенсивности космических лучей на изменения климата

Основные доминирующие факторы, ответственные за естественные колебания температуры атмосферы, в первую очередь связаны с падающей на земную поверхность прямой солнечной радиацией, прозрачностью атмосферы, альбедо подстилающей поверхности Земли. Радиационный баланс  $R$  на земной поверхности [2] состоит из поглощающей части прямой солнечной радиации  $F$  и рассеянной радиации  $J$ , а также излучения земной атмосферы  $B_0$ :

$$R = F(1-r) + J(1-r) - B_0, \quad (1)$$

где  $r$  – альбедо.

К этим трем основным членам уравнения радиационного баланса можно добавить и другие немаловажные члены, учитывающие действия других факторов, такие как  $A_{aэp}$  (атмосферный аэрозоль);  $A_{кл}$  (космические лучи);  $A_{adv}$  (адвективный фактор);  $A_{астp}$  (астрономический фактор);  $A_{oa}$  (взаимодействие океана с атмосферой);  $A_{CO_2}$  (антропогенный фактор, связанный с выбросами в атмосферу углекислого газа  $CO_2$ ).

Сгруппировав эти члены по характеристикам нагревания и охлаждения атмосферы, выражение (1) можно записать в виде:

$$R = F(1-r) + J(1-r) - B_0 - A_{aэp} - A_{кл} \pm A_{adv} \pm A_{астp} + A_{oa} + A_{CO_2}. \quad (2)$$

Из полного уравнения радиационного баланса видно, что в первую очередь он связан с прямой солнечной радиацией  $F$  и рассеянной радиацией  $J$ . При выявлении причин долгопериодных изменений температурного режима нижней атмосферы необходимо проводить скользящее сглаживание с 11-летним интервалом осреднения. Соответственно, фактически полная величина  $F_n$  должна определяться интегрированием за 11-летний и последующие временные периоды измерений:

$$F'_n = k \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt. \quad (3)$$

Здесь  $t_1$  и  $t_2$  – временные интервалы осреднения.

На рис. 1 приведена зависимость полного интеграла прямой солнечной радиации  $F_n$  от 11-летних циклов, рассчитанного через радиоизлучение Солнца на длине волны 10,7 см. Площади, очерченные кривой линией, соответствуют вариациям солнечного параметра  $F_{10,7}$ . Эта величина определяется интегрированием на временном интервале  $(t_1 - t_2)$  между максимумами и минимумами 11-летней солнечной активности.

Уменьшение величины  $F_n$  происходит не только за счет уменьшения амплитуды солнечных циклов, но и за счет их длительности  $\Delta t$ .

Вычисления величины  $F_n$  проводились с 1985 по 2012 г. для 22, 23 и еще не заверщенного 24-го цикла солнечной активности и вероятный прогноз  $F_n$  до 2025 года.

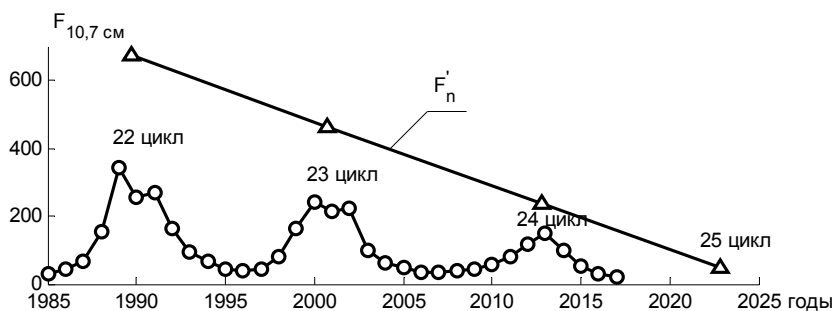


**Рис. 1.** Изменения прямой солнечной радиации и параметра  $F_{10,7}$ .

Рассмотрим, каким образом будет происходить ответ климатических изменений на снижение уровня солнечной активности. На этот вопрос ответили климатологи из Великобритании [16]. Поток солнечной энергии на верхней границе атмосферы определяется солнечной константой  $S$  с допустимыми пределами  $\pm 0,25\%$ . В этих пределах может варьировать полный поток солнечной энергии, поступающий на Землю. Электромагнитный спектр Солнца близок к абсолютно черному телу. В этом смысле излучаемая Солнцем энергия описывается законом Стефана – Больцмана. Полное излучение Солнца определяется выражением

$$J_s \approx \sigma T_s^4 \left( \frac{R_0}{R_1} \right)^2, \quad (4)$$

где  $T_s = 5770$  К ( $6043^\circ\text{C}$ );  $J_s = (36061 \text{ Вт/м}^2)$ ;  $R_0$  – радиус Солнца;  $R_1$  – расстояние от Земли до Солнца. Величина  $R_0$  изменяется до  $0,02\%$  за 10 лет, изменения магнитного поля Солнца также влияют на изменение  $R_0$ . На  $R_1$  влияют крупные планеты в Солнечной системе.

Мощность солнечной энергии, поступающей на единицу земной поверхности, определяется из уравнения баланса радиационной энергии выражением:

$$P = \sigma T_s^4 - G + \gamma, \quad (5)$$

где  $G$  – отраженное, излучаемое Землей инфракрасное (тепловое) излучение;  $\gamma$  – часть энергии, поглощенная Землей.

Преобразуя посредством дифференцирования уравнение баланса солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, можно получить выражение:

$$P_s = 4\sigma T_s^3 \Delta T_s + \Delta \gamma. \quad (6)$$

В величину  $\Delta T_S$  входят все изменения в солнечной активности – это изменения величин  $R_0$ ,  $R_1$ , магнитного поля Солнца, количества пятен на Солнце. Изменение солнечной активности является определяющим фактором в изменении климата. Эту идею разделяют многие ученые, занимающиеся проблемой изменения климата.

Космические лучи (КЛ), проходя через тропосферу, способствуют формированию облачности в тропосфере. В [10] были проведены оценки вклада КЛ в изменения температурного режима приземной атмосферы. Было показано, что за отдельные периоды, характеризующиеся аномально высокими значениями энергии КЛ (осенью 2011 года), величина их вклада в понижение температуры приземной атмосферы составляла 15–20 %. В 2008 г. наблюдался аномально высокий всплеск интенсивности потока космических лучей с энергией выше  $7 \times 10^{-4}$  Mev/nuc. При этом произошло резкое падение приземной температуры в среднем на 3 °С, что в процентном соотношении составляет 30 % [10]. В этот период было отмечено увеличение доли облаков вертикального развития и верхнего яруса. Таким образом, космические лучи могут оказывать управляющее действие на образование облачности, а через нее – и на температурный режим приземной атмосферы.

## **2. Роль адвективного фактора и атмосферного аэрозоля в изменениях приземной температуры**

Оценка вклада адвективного фактора в изменения температурного режима приземной атмосферы была проведена на примере анализа развития циркуляционных процессов в атмосфере Центральной Азии (ЦА) [6, 7]. В 2011 году в регионе Кыргызстана было аномально холодное лето, понижение приземных температур от  $+(25-30)$  °С до  $+(5-10)$  °С, выпадение снега, связанные с северными холодными вторжениями. Похолодания отмечались от Западной Сибири до Таджикистана и Афганистана, охватывая практически всю территорию ЦА. Подобные процессы с выносом холодных арктических масс воздуха на средние широты региона ЦА через Западную Сибирь отмечались и в осенне-зимний период 2012 г., что также привело к резкому падению температуры в регионе ЦА. Анализ данных метеонаблюдений и карт погоды в периоды северных холодных вторжений над регионом ЦА в теплый период года показал, что эти процессы развивались по ультраполярной траектории, что и обусловило распространение холода на всю территорию ЦА. При этом вынос холодных арктических масс воздуха осуществлялся напрямую с Карского моря через Западно-Сибирскую низменность на регион ЦА. Столь резкое похолодание неоднократно приводило к выпадению снега на обширной территории от Казахстана до Афганистана.

Таким образом, вынос холода из арктических широт в регион Центральной Азии в весенне-летний и осенне-летний периоды может приводить к понижению приземной температуры примерно в два раза. Эти процессы показывают влияние адвективного атмосферного фактора на

изменение радиационного баланса приземной атмосферы [6, 7, 17]. В данном случае величина его вклада в изменения радиационного баланса достигала 40–50 % и была доминирующей по сравнению с другими факторами.

В нижней атмосфере на высотах 1–3 км находится максимум концентрации незаряженных аэрозолей, которые под действием КЛ способны конденсировать на себе водяные пары и образовывать нижний ярус облачности. Известно, что нижняя облачность составляет примерно 40 % от общей облачности и обладает самым высоким альбедо, соизмеримым и даже больше общей отражательной способности парниковых газов. По данным таджикских ученых, в периоды повышенного загрязнения атмосферы над Таджикистаном происходит понижение приземной температуры на 2 °С относительно среднего значения 13,8 °С, что составляет около 15 % [1]. Эти данные хорошо согласуются с данными лидарных измерений аэрозоля в Кыргызстане на ст. Теплоключенка [9].

Таким образом, можно говорить о среднем вкладе аэрозольного фактора в величину похолодания приземной атмосферы. При этом если вклад аэрозольного фактора в радиационный баланс  $R$  оценивается в 15–17 %, то вклад других факторов, к примеру  $\text{CO}_2$ , оценивается на уровне 20 %, а средний вклад космических лучей за короткий период времени оценивается в 12–15 %. Таким образом, в различные периоды времени разные факторы могут вносить свой определенный вклад в радиационный баланс земной атмосферы. Но при этом изменения солнечного фактора являются постоянно действующими, медленно изменяющимися во времени.

Значительный вклад в изменения температурного режима приземного слоя атмосферы вносит альбедо подстилающей поверхности, коэффициент которого в некоторых случаях может изменяться от 0,3 до 0,9 единиц. Этот параметр также меняется во времени. Так, к примеру, вырубка лесов, кустарников, опустынивание, изменение высоты и площади снежного покрова, загрязнение океана и т. д. влияют на этот параметр. Фактическое нагревание земной поверхности экспериментально определяется актинометрическими измерениями или величиной инсоляции. Эти измерения показывают, что по всему Северному полушарию процесс изменения климата имеет далеко не однородную структуру. Это указывает на то, что есть регионы, отличающиеся по уровню потепления, как с повышенным, так и с низким его значением.

Российские специалисты представили карты распределения падающей солнечной радиации по территории Северного полушария, включая детальную карту для Российской Федерации и стран СНГ за 2012 год [11]. По этим картам видно четкое отличие количества притока тепла, падающего на европейскую территорию до Уральского хребта (положительные значения) и на территорию за Уральскими горами (нулевые и даже отрицательные температуры). Из этого следует, что на европейской территории в 2012 г. отмечался процесс потепления, а на азиатской территории от Уральских гор до Тихого океана отмечался процесс похолодания.

По нашим данным [6, 7], подобная ситуация наблюдалась на азиатской части территории летом 2011 г. В августе 2011 г. по Центральноазиатскому региону от Западной Сибири до Таджикистана отмечалось резкое похолодание, не характерное для летнего периода. При этом «язык холода» охватил регион всей Центральной Азии вплоть до Афганистана.

В регионе Поволжья после 2008 года отмечается спад скорости потепления до нулевых значений. Это также указывает на то, что в Среднем Поволжье после 2008 года происходит медленный процесс похолодания [11].

### **3. Управляющая роль солнечной активности в региональных и глобальных изменениях температуры**

Сравнение вариаций солнечной активности и приземной температуры после исключения из них составляющих с периодами менее 11 лет убедительно показывает высокий уровень зависимости долгопериодных колебаний приземной температуры от изменений солнечной активности. В период с 1920 г. по 2000–2005 гг., по данным сети метеостанций Кыргызстана, в вариациях приземной температуры наблюдался медленный процесс потепления со скоростью от  $+0,008$  до  $+0,01$  °C/год, т. е. среднепериодная температура за 100 лет повысилась на  $0,8$ – $1,0$  °C. Отмечался медленный процесс потепления, хотя вполне вероятно, что эта величина укладывается в статистические флуктуации измеряемой величины. Самые теплые годы в прошлом столетии пришлось на 1995–1998 гг.

По нашим результатам исследований и данным, полученным в Великобритании [13], с 2002–2005 гг. по настоящее время в Северном полушарии идет медленный процесс охлаждения атмосферы. По данным исследований в Великобритании, начиная с 2002 г. идет процесс похолодания со скоростью  $0,0085$  °C/год. Как видно, процесс похолодания идет с той же скоростью, что и потепление за предшествующие годы.

На рис. 2 приведены три кривые изменений приземной температуры: среднегодовой (рис. 2 а) и за холодное полугодие (XI, XII, I, II месяцы) по МС Бишкек (рис. 2 б) и вариации глобальной среднегодовой температуры (рис. 2 в) по данным Центра по изучению климата в Лондоне [13].

На рис. 2 а приведены изменения сглаженной по 11 годам приземной среднегодовой температуры воздуха по ст. Бишкек за период с 1980 по 2011 г. Отмечается медленный спад среднегодовой температуры и небольшие ее флуктуации. На рис. 2 б приводятся данные за холодное полугодие, где виден более резкий спад температуры. На рис. 2 в в вариациях глобальной температуры видно, что после 2002 г. начался процесс похолодания.

Общим для всех трех рисунков является то, что начиная с 2002–2003 гг. отмечается понижение приземной температуры. Так, по данным МС Бишкек скорость потепления до 2003 г. составляла  $+0,4$  °C/10 лет, а после 2003 г. охлаждение атмосферы составило

$-0,5^{\circ}\text{C}/10$  лет. По данным вариаций глобальной среднегодовой температуры, полученным в Центре по изучению климата в Лондоне, скорость потепления составляла  $+0,2^{\circ}\text{C}/10$  лет, а после 2002 года скорость охлаждения составила  $-0,085^{\circ}\text{C}/10$  лет. Как видно, скорость регионального похолодания по ст. Бишкек на порядок ниже средней скорости глобального похолодания. Данные, приведенные на рис. 2 б, указывают на то, что процесс похолодания в холодное полугодие по данным МС Бишкек начинается с 2003 г. и происходит значительно быстрее среднегодового охлаждения, протекая со скоростью от  $-1,5^{\circ}\text{C}/10$  лет до  $-2,5^{\circ}\text{C}/10$  лет.

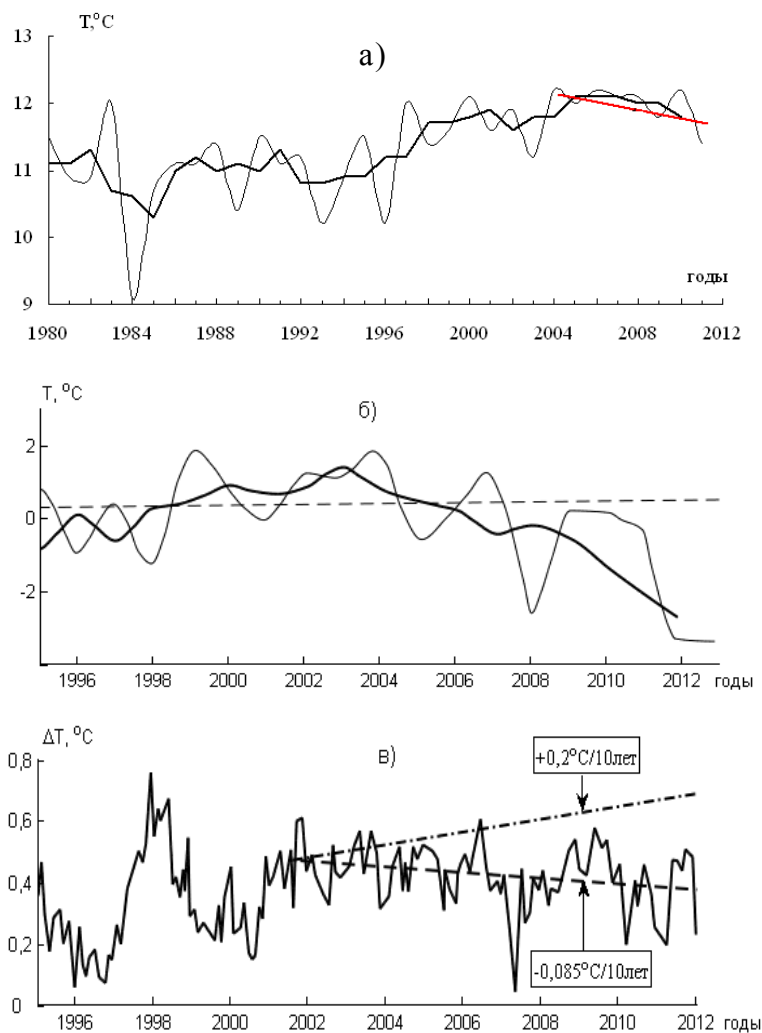


**Рис. 2.** Многолетние вариации среднегодовой приземной температуры воздуха (а); аномалий температуры за холодное полугодие по МС Бишкек (б); глобальной среднегодовой температуры по данным Центра исследования климата в Лондоне (в).

Известно, что в настоящий период времени в вариациях температуры приземной атмосферы доминирует 60-летняя периодическая составляющая. По нашим расчетным данным, амплитуда 60-летней периодичности составляет около  $0,7^{\circ}\text{C}$  с максимумом амплитуды, приходящимся на 1995 г. [7]. К 2025 г. только за счет амплитуды 60-летней составляющей произойдет снижение среднегодовой приземной температуры на  $-0,7^{\circ}\text{C}$ . При этом антропогенный фактор, связанный с ростом  $\text{CO}_2$ , повысит температуру на  $+0,4^{\circ}\text{C}$  (рис. 2), при этом произойдет повышение температуры за счет влияния поверхностной температуры вод океанов приблизительно на  $+0,2^{\circ}\text{C}$ .

Итак, в целом повышение температуры за счет антропогенного фактора произойдет примерно на  $0,4^{\circ}\text{C}$ , в то же время за счет влияния 60-летней составляющей произойдет ее понижение на  $0,7^{\circ}\text{C}$ .

В целом только за счет этих двух факторов произойдет понижение температуры. По нашим данным, как в вариациях солнечной активности, так и приземной температуры существует вековая составляющая с периодом 95 лет и максимумом, приходящимся на 1993–1995 гг. Амплитуда вековой составляющей приблизительно равна  $1,0^{\circ}\text{C}$ , а следующий ее минимум ожидается в 2040 г. Это еще более усугубит процесс похолодания приземной атмосферы в период с 2025 по 2040 г. Фактически солнечная активность в 24-летнем цикле и далее пойдет на спад. Ожидается, что в течение последующих 200 лет она начнет медленно и заметно снижаться, соответственно будет понижаться и приземная температура. К 2025–2040 гг. солнечная активность будет минимальна, а амплитуды 60 и 95-летней составляющих будут находиться в минимуме.

Подтверждение наших фактов мы находим в исследованиях рабочей группы австралийских ученых [13], которые показали, что в 24 и 25-летнем циклах солнечной активности произойдет долгопериодное понижение температуры, которое продлится 200 лет. По их данным, понижение глобальной температуры произойдет в среднем на  $1,5^{\circ}\text{C}$  от 2007 к 2025 году. По нашим данным понижение температуры за аналогичный период может составить  $2,5^{\circ}\text{C}$ .

Разница между падающей солнечной радиацией от ближайшего солнечного максимума в 1970 г. до минимума в 2013 г. составила 80–90 ед. чисел Вольфа  $W$ . В пересчете на мощность поток солнечного излучения, полученный с 2002–2003 гг. по настоящее время, уменьшился на  $0,16 \text{ Вт/м}^2$ . А к 2025–2030 гг. мощность солнечного излучения уменьшится на  $0,18 \text{ Вт/м}^2$ . Известно, что до Земли доходит 60–65 % солнечной радиации, 35–40 % отражается обратно в космос. В пересчете на мощность излучения поглощенная часть ориентировочно составит  $3,35 \text{ Вт/м}^2$ , а отраженная часть –  $1,17 \text{ Вт/м}^2$ .

С учетом этих фактов можно ожидать, что к 2025–2030 гг. произойдет снижение мощности солнечного излучения на  $0,18 \text{ Вт/м}^2$ . Полная величина падающего на Землю потока солнечной радиации снизится до  $3,17 \text{ Вт/м}^2$ .

#### 4. Роль океана в изменении приземной температуры воздуха

Доминирующую роль в формировании тенденции понижения приземной температуры (изменения климата) играет не только понижение солнечной активности, но и динамика нагревания или охлаждения океана на  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже. На первом этапе понижение солнечной активности и океан будут играть доминирующую роль, поскольку  $2/3$  земной поверхности покрыто океаном, а его теплоемкость во много раз больше теплоемкости суши. В течение десятка лет на поверхность океана будет поступать меньше солнечного тепла, и в какой-то период времени поверхностная температура океана значительно снизится. Это в свою очередь приведет к повышенному поглощению океаном  $\text{CO}_2$  и, соответственно, к уменьшению парникового эффекта.

Известно, что поверхностная температура океана зависит от солнечной активности [15]. Так, в периоды максимума солнечной активности рост поверхностной температуры океана достигает  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в периоды минимальной активности он опускается до нулевых и даже отрицательных отметок. Из этих данных можно определить среднюю скорость нагревания или охлаждения океана, которая, согласно вышеприведенным данным, составляет  $\pm 0,017\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ . Суммарное воздействие всех парниковых газов на радиационный режим атмосферы, по данным английских ученых, меньше  $1,17\text{ Вт}/\text{м}^2$  [13]. Эта величина потепления может компенсироваться понижением температуры за счет аэрозольного загрязнения и космических лучей, вклад которых оценивается величинами от  $-0,6$  до  $-1,3\text{ Вт}/\text{м}^2$ .

#### 5. Оценка степени вклада различных факторов в изменения приземной температуры воздуха

В ряду факторов, оказывающих определенное влияние на радиационный баланс поступающей на Землю тепловой энергии, можно выделить два класса факторов. Первый – это фактор, имеющий долгопериодные периодические составляющие с периодами более 10–15 лет. Второй фактор – это короткопериодные составляющие, действующие в течение периодов от месяца до года. К короткопериодным факторам можно отнести воздействие космических лучей, адвективный атмосферный и астрономический факторы.

К долгопериодным факторам относятся: солнечное воздействие, взаимодействие океан-атмосфера, антропогенный фактор. Оценка степени вклада всех вышеуказанных факторов в изменение температурного режима приземной атмосферы приведена в таблице.

Суммарный эффект воздействия долгопериодных факторов, связанных со снижением уровня солнечной активности, интегрируется за рассматриваемый период времени и приводит к существенным долгопериодным изменениям температурного режима приземной атмосферы [18].

**Таблица.** Результаты оценок степени вклада различных факторов в изменения приземной температуры воздуха

| <b>Факторы</b>                 | <b>Степень вклада</b>                                                      |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Поглощенная солнечная радиация | 50–60 %                                                                    |
| Рассеянная солнечная радиация  | 40 %                                                                       |
| Излучение земной атмосферы     | 10–15 %                                                                    |
| Альбедо                        | 20–80 %                                                                    |
| Взаимодействие океан-атмосфера | $\pm 0,017$ °C/год                                                         |
| Солнечные циклы                | 0,25 % – перепад солнечного излучения от max до min в 11 и 22-летние циклы |
| Атмосферный аэрозоль           | 15–17 %                                                                    |
| Адвективный фактор             | 40–50 % – периодически в зависимости от времени года и региона             |
| Антропогенный фактор           | 20–25 % – в зависимости от сезона года                                     |
| Космические лучи               | 15–20 % – периодически                                                     |
| Космические факторы            | наклон земной оси, планеты Солнечной системы и др.                         |

Вклад аэрозольной и космической компонент может достигать 15–20 %, т. е. практически компенсировать приток тепла от парниковых газов, а в отдельных случаях и превзойти его. Так, к примеру, космические лучи могут опосредованно влиять на образование нижней облачности на высотах ниже 3 км. Нижняя облачность составляет примерно 40 % от общей облачности и обладает самым высоким альбедо. Отражательная способность облаков порядка  $15\text{--}20 \text{ Вт/м}^2$  и соизмерима с вкладом парниковых газов в нагревание приземной атмосферы. Таким образом, космические лучи могут оказывать управляющее действие на облачность, а через нее – и на температурный режим приземной атмосферы [10].

Другим и, пожалуй, самым существенным фактором является адвективный фактор, связанный с переносом холода с арктических широт на средние широты. В зимний и летний периоды 2011 г. он достигал 50 % и тем самым практически в два раза перекрывал влияние вышеперечисленных факторов.

Существенное влияние на климат оказывают океаны и океанические теплые течения типа Гольфстрим, а также периодически появляющиеся течения Эль-Ниньо и Ла-Ниньо [11]. Есть еще и астрономические факторы, влияющие на долгопериодные изменения климата. К ним относятся общеизвестные циклы Миланковича, прецессия земной оси, влияние на земную атмосферу крупных планет солнечной системы Юпитера и Сатурна. Астрономические факторы, как правило, имеют большие периодичности – более 100 лет [3].

Разложение Фурье сглаженных по 3 и 11 годам температурных рядов по ст. Каракол (Пржевальск) длительностью 120 лет и по ст. Бишкек (Фрунзе) длительностью 80 лет позволило нам выделить в них долгопериодные составляющие с периодами 12, 35, 50–55 и 90–95 лет. Наиболее

значимыми по амплитуде оказались периодичности в 22 года, 50–55 лет и 90–95 лет, с амплитудами 0,6–0,8 °C. Для каждой амплитуды была определена своя начальная фаза колебания. Максимум амплитуды (50–55)-летней составляющей пришелся примерно на 2002–2005 гг. В настоящее время идет спад этой амплитуды, и очередной минимум температуры ожидается в 2027–2030 годах.

Из этих данных можно заключить, что в настоящий период происходит процесс медленного похолодания. Какие факторы приводят к изменению приземной температуры с периодичностью около 50–55 лет – этот вопрос пока остается открытым. Высказываются мнения о влиянии возмущающей силы крупных планет в Солнечной системе, таких как Юпитер и Сатурн.

Другое мнение, противоположное точке зрения о влиянии астрономического фактора, сводится к влиянию происходящих в мантии Земли глубинных процессов [11]. В мантии происходят активные процессы, приводящие к возмущениям с периодичностью 50–55 лет, которые, распространяясь через глубины океана, достигают поверхности Земли. Эти возмущения в последующем приводят к появлению сейсмоактивных зон на дне океана, активизация которых может порождать мощные цунами, приводящие к катастрофическим последствиям на побережье. Подобные аномалии происходят примерно 1 раз в 50 лет. Как было отмечено выше, природа происхождения возмущений в земной мантии с периодами около 50 лет пока остается открытой.

## **6. Связь долгопериодных вариаций приземной температуры с солнечной активностью**

Рассмотрим связь долгопериодных вариаций приземной температуры с вековыми колебаниями солнечной активности. На рис. 3 приведены вариации выделенной вековой составляющей солнечной активности в числах Вольфа и аномалий приземной температуры за холодное полугодие по МС Бишкек за период с 1935 по 2011 г. после исключения из них составляющих с периодами менее 11 лет. Коэффициент корреляции между  $\Delta W$  и  $\Delta T$  равен 0,82. Максимумы амплитуд в вариациях солнечной активности опережают максимумы в периодических составляющих температуры на 2,5–3 года.

Анализ данных роста концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере (по данным станции Иссык-Куль) и изменений среднегодовой приземной температуры (по МС Бишкек) показывает, что среднегодовая температура начиная с 2005 г. стабилизировалась на уровне 12,1 °C. Аналогичное, но более выраженное изменение отмечается и для холодного полугодия, когда средняя температура в 2011–2012 гг. составляла 0,5–1,0 °C, и дальнейшего роста температуры до 2010 г. не отмечается. За этот же период отмечен непрерывный рост концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере [8]. Эти же результаты в виде отрицательной корреляции  $r = -0,5$  между изменениями концентрации  $\text{CO}_2$

и приземной температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) отмечены и по результатам анализа измерений температуры в г. Душанбе [1]. Данные изменений концентрации  $\text{CO}_2$  (ст. Иссык-Куль) и температуры по ст. Бишкек приведены на рис. 4.

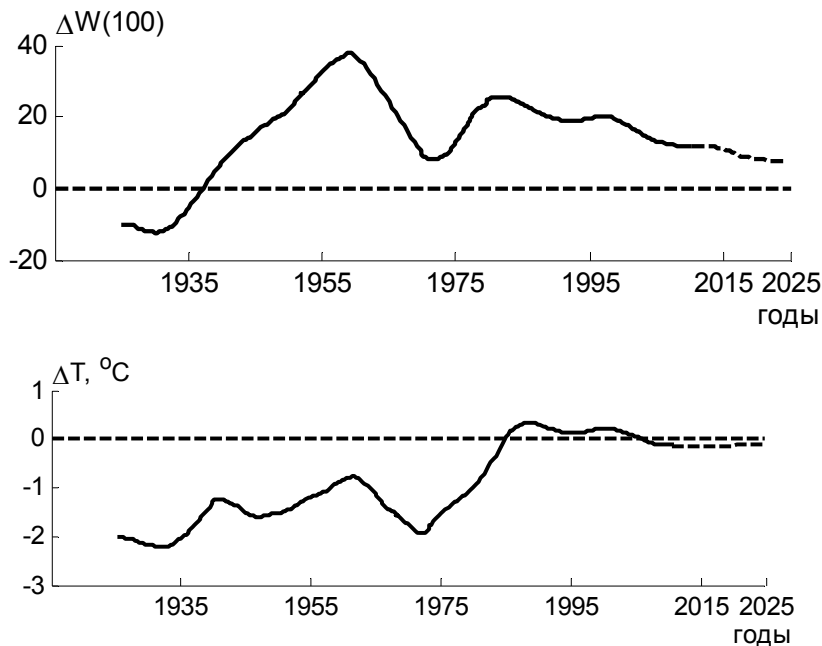


**Рис. 3.** Вариации вековой составляющей солнечной активности и аномалий приземной температуры за холодное полугодие по ст. Бишкек с 1935 по 2011 г.

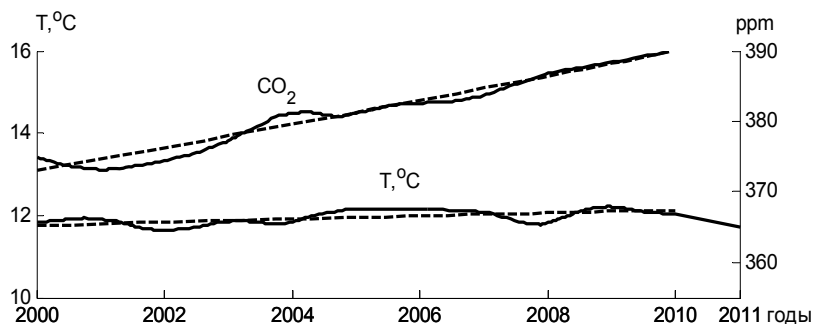


**Рис. 4.** Изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере по ст. Иссык-Куль и приземной среднегодовой температуры по ст. Бишкек.

Рассмотрим влияние солнечной активности на температурный режим нижней атмосферы. Хорошо известно, что период малого ледникового периода на Земле с 1650 по 1750 г. совпал с известным Маундеровским

минимумом в солнечной активности. После этого начался рост солнечной активности, максимум векового цикла отмечался с 1985 по 1995 г. В солнечных циклах доминируют цикличности с периодами 11–13, 21–23, 35–42, 55–60 и 85–100 лет. Эти же периодичности синхронно выделяются и в климатических вариациях параметров нижней атмосферы, что указывает на реально существующую связь изменений приземной температуры с солнечной активностью, о чем отмечено в [8]. Здесь же было показано, что до 70 % антропогенных загрязняющих веществ находятся в слое атмосферы 1,2 км. Можно считать, что основное нагревание атмосферы сосредоточено в нижних слоях, преимущественно в приземном слое, что согласуется с последними работами океанологов.

Очередная фаза потепления в естественном фоновом цикле глобальных изменений температуры, наблюдаемая с 1985 по 2005 г., повторяется через каждые 55–60 и 90–95 лет. Причины последних 60-летних колебаний температуры связывают с периодом обращения Юпитера вокруг Солнца. Период с 2000 по 2005 г. характеризовался беспрецедентно высоким уровнем солнечной активности за последние 400 лет. Максимум потепления в нижней атмосфере совпал с максимумом солнечной активности. При этом коэффициент корреляции  $r$  между приземной температурой и солнечной активностью был равен 0,82.

После этого периода солнечная активность начинает спадать. По прогнозам специалистов, в 2025–2030 гг. ожидается ближайший минимум векового цикла солнечной активности со спадом активности до уровня, отмечавшегося в 17 веке (минимум Маундера). Как было показано, скорость изменения величины потепления после 2005 года начала спадать, и с учетом только природного солнечного фактора величина изменения приземной температуры будет снижаться, т. е. будет происходить постепенное похолодание.

## **7. Эмпирическое моделирование климатических изменений приземной температуры**

Проведем эмпирическое моделирование региональных климатических изменений приземной температуры над Центральной Азией. Рассмотрим на основе эмпирического моделирования одновременное действие на изменение климата этих двух факторов, влияющих в различной степени на температуру приземной атмосферы на разных временных интервалах. В основу эмпирического моделирования положены долгопериодные составляющие в вариациях температуры приземной атмосферы и параметра солнечной активности с периодами более 11 лет, выделенные методом вейвлет-преобразования [6].

Проведем суммирование амплитуд долгопериодных колебаний температуры с учетом фазы колебаний соответствующей составляющей. На рис. 5 приведена сглаженная составляющая, равная сумме амплитуд вышеперечисленных гармоник:

$$\Sigma \{A_{22}(\varphi) + A_{35}(\varphi) + A_{55}(\varphi) + A_{90}(\varphi)\}$$

с учетом начальной фазы колебаний (кривая с индексом 3) за период с 2010 до 2030 г. Эта результирующая линия «3» в большей степени отражает учет природного фактора солнечного происхождения. Данные результаты отражают тот факт, что уровень солнечной активности после 2000–2005 гг. резко пошел на спад.

В то же время не исключается действие антропогенного фактора. На рис. 5 линия с индексом «1» отражает долгопериодные изменения температуры, обусловленные антропогенным фактором. Суммарное действие природного (линия «3») и антропогенного (линия «1») факторов представлено на рис. 5 пунктирной линией с индексом «2». Как было отмечено ранее (рис. 4), температура по данным МС Бишкек с 2005 по 2010 г. стабилизировалась с тенденцией к небольшому похолоданию в дальнейшем.

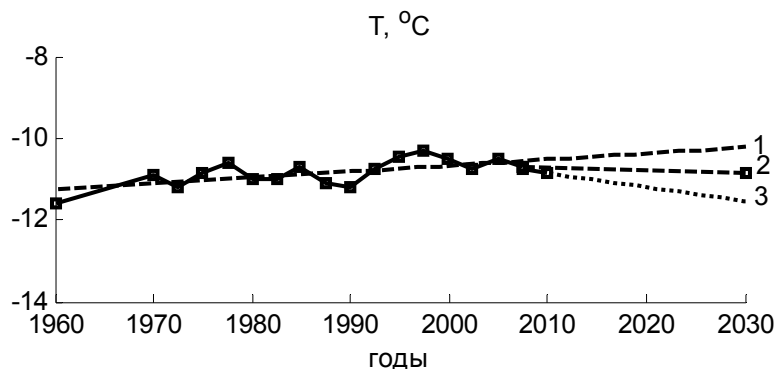


**Рис. 5.** Вариации приземной температуры с 1960 по 2010 г. по ст. Бишкек (зима). Пунктиром дан прогноз до 2030 г.

Результирующая кривая «2» является продолжением дальнейших изменений температуры после 2010 г., при этом отмечается тенденция к дальнейшему похолоданию до 2030 года. Подобные результаты были получены в [14], где проанализированы аналогичные данные с учетом парниковых газов и других факторов.

### Заключение

Показано, что параметры климатических характеристик Центрально-азиатского региона существенно разнятся от аналогичных характеристик в Европейском регионе. В Западно-Сибирском и Центральноазиатском регионах в последние 10–15 лет идет медленный процесс похолодания. Существенную роль в нем играют меридиональный (адвективный) вынос холодных масс воздуха с арктических широт.

В настоящее время в научных кругах идет активная дискуссия по поводу глобального потепления, поскольку современные модели климата

несовершенны и не учитывают ряд факторов. В последние 10–15 лет среднеглобальная температура приземной атмосферы стабилизировалась, и далее отмечена тенденция к ее понижению. Ранее аналогичные результаты получены нами по Центральноазиатскому региону в 2005 году.

Действие на климатическую систему внешних астрономических и геофизических факторов сводится к изучению изменчивости светимости Солнца, положения орбиты Земли и других планет в солнечной системе и т. д., что в конечном счете сводится к изучению радиационного баланса на земной поверхности. Одним из астрономических факторов являются космические лучи. Известно, что при минимуме солнечной активности интенсивность космических лучей максимальна. Космические лучи в нижней атмосфере служат центрами конденсации водяных паров, приводящих к дополнительному возрастанию облачности среднего яруса.

Показано, что 60-летняя периодичность в вариациях температуры приземной атмосферы обусловлена положением Юпитера в солнечной системе. В настоящем столетии доминирует 60-летняя составляющая, минимум амплитуды которой придется на 2025–2030 гг., при этом ее средняя амплитуда колеблется на уровне 0,5–0,6 °C.

К другой группе факторов, влияющих на формирование температурного режима приземной атмосферы, относятся внутренние и геофизические факторы. Одним из них является адвективный фактор, связанный с меридиональным выносом воздушных масс с арктических широт в средние широты. Вынос холода с арктических широт в Центральноазиатский регион может изменить температуру приземной атмосферы на 50 %. Это свидетельствует о существенном вкладе адвективного фактора в радиационный баланс приземной атмосферы, которым никак нельзя пренебрегать.

Полученная эмпирическая модель регионального изменения температурного режима нижней атмосферы в Центральной Азии свидетельствует о процессе похолодания в приземном слое атмосферы, обусловленном влиянием солнечной активности, определяющей температурный режим всего земного шара.

*Поступила в редакцию 21.09.2017 г.*

#### Список использованных источников

1. Абдуллаев С.Ф. и др. Исследования аэрозольности загрязнения атмосферы и результаты пылевых бурь и его влияние на изменение климата. // Труды. Междунар. конф. «Влияние глобального изменения климата на экосистемы средней и высокогорной зоны Центральной Азии». Душанбе, 2012. С. 214–217.
2. Будыко М.И. Климат конца двадцатого века. // Метеорология и гидрология. 1988. № 10. С. 5–24.
3. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Том 3. Часть 2. Природные процессы в полярных областях Земли I // под ред. акад. В.М. Котлякова. М.: ИГЕМ РАН, 2012.
4. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Вариации солнечной постоянной и температурный режим нижней атмосферы // Доклады НАН КР. 2014. № 1. С. 38–43.

5. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Изменения регионального климата, обусловленные природными и антропогенными факторами // Экология Кыргызстана: проблемы, прогнозы, рекомендации / под ред. проф. К.А. Каримова. Илим; Бишкек, 2000. С. 66-81.
6. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Основные факторы изменения регионального климата в Центральной Азии // Труды Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. С. 12-16.
7. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Роль природных и антропогенных факторов в изменение температурного режима нижней атмосферы и солнечная активность. // Известия НАН. 2012. № 2. С. 62-69.
8. Каримов К.А., Жунушова Г.Ш. Характеристики нижней атмосферы над Кыргызстаном и их связь с солнечной активностью. Бишкек, 2011. 158 с.
9. Каримов К.А., Чен Б.Б. Вклад солнечного излучения, аэрозоля и космических лучей в региональные изменения климата // Физика, Бишкек. 2013. № 2. С. 33-43.
10. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д., Крылов С.В. Связь температурного режима нижней атмосферы с вариациями солнечной активности и интенсивностью космических лучей // Вестник КГУСТА. 2011. № 3(33). С. 168-172.
11. Тезисы докладов Международной научной конференции по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2012. 363 с.
12. Шерстюков Б.Г. Факторы изменений и колебаний климата // Тезисы докладов Международной научной конференции по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Казань, 2012. С. 231.
13. Gregory K. Climate Change Science. Calgary, Alberta, Canada, 2013. 114 p.
14. Hansen J., Sato M. Greenhouse gas growth rates // Proc. Natl. Acad. Sci. 2004. Vol. 101. P. 16109-16114; doi:10.1073/pnas.040698101.
15. Living with a Star: New Opportunities in Sun-Climate Research // Report of the NASA LWS Sun-Climate Task Group. NASA 2003. 52 p.
16. Lockwood M. Solar change and climate: an update in the light of the current exceptional solar minimum // Proc. R. Soc. A. 2010. Vol. 466. P. 303-329. doi:10.1098/rspa.2009.0519.
17. Karimov K.A. Atmospheric mechanisms of admixtures transfer above Central Asia region: methods of control and results of monitoring // Proceedings of SPIE/International Conference on Lasers, Applications and Technologies, USA. 2006. Vol. 6284. P.628403.
18. Karimov, K.A., Gainutdinova, R.D. Regional atmospheric changes caused by natural and anthropogenic factors // Proceedings of NATO ARW «Global Atmospheric Change and its Impact on Regional Air Quality», Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, NATO Science Series: IV. Earth and Environmental Sciences. 2003. Vol. 16. P. 209-213.

## SUMMARIES

**Role of different physical factors in long-term changes of surface temperature** / Karimov K.A., Gainutdinova R.D. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 121-136.

The analysis of long-term changes of surface air temperature in the Central Asia region is presented. It is shown that cooling process in this region began in 2005. The obtained empirical model of the regional change of lower atmosphere temperature regime in the Central Asia is indicative of the process of cooling in the surface air layer caused by the influence of solar activity, which determines the temperature regime of the globe as a whole.

*Keywords:* atmosphere, temperature, solar activity, climate change.

УДК 551.513

## ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ В СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ ПОЛУШАРИЯХ

**М.Л. Арушанов, У. Жумаев**

*Научно-исследовательский гидрометеорологический институт  
(НИГМИ), г. Ташкент  
miki-arushanov@rambler.ru*

Рассматриваются циркуляционные особенности крупномасштабного термодинамического соленида в Северном и Южном полушариях для слоя атмосферы 1000–500 гПа. Показано, что распределение климатической энергии циркуляции, как функции долготы и времени года, в Северном полушарии достаточно «гладкое» по долготе в то время как в Южном полушарии имеет волновой характер. На территории Южного полушария укладываются две волны энергии циркуляции в пропорции ~1:2.

*Ключевые слова:* циркуляция скорости, вихрь скорости, энергия циркуляции, кинетическая энергия, мощность потока.

Конец 50-х – начало 60-х годов прошлого столетия в области метеорологии отмечаются широким использованием теоремы вихря в целях прогноза динамики движения систем в свободной атмосфере, мотивированное ранее опубликованной работой Россби [8], где было установлено, что движение волнообразных циркуляционных систем в значительной мере определяется скоростью зонального ветра и параметром Кориолиса. Основы теории вихревых движений заложены в работе Гельмгольца [7], в которой показана значительная устойчивость этих движений. Вслед за Гельмгольцем, Бьеркнес, указывая на значение бароклинности в динамике атмосферных движений, доказал теорему циркуляции [6].

Применение теоремы циркуляции к прогнозу перемещения и развития систем движения в свободной атмосфере выводит рассмотрение потока воздуха в динамической метеорологии на первый план.

Все движения в атмосфере против диссипации трения поддерживаются источниками тепла и холода. Общий характер связей в вариациях напряжения и положений высотных термобарических полей с процессами циркуляции был установлен Х.П. Погосяном [4]. В частности,

им было показано, что во фронтальных зонах критерием неустойчивого равновесия потоков воздуха является градиент температуры, превышающий  $8^\circ/1000$  км. Сами по себе потоки воздуха являются более чувствительными к изменениям в соотношениях энергии или изменениям температурных контрастов, чем термобарические поля. С этой точки зрения средняя температура воздуха за определенный промежуток времени есть интегральный статистический показатель динамического теплового равновесия в процессах преобразования солнечной энергии в атмосфере и подстилающей поверхности. Задача сводится к отысканию некоторой функции  $F(T) = F\left(\frac{dT_m}{dt}, T_m\right) = \frac{dC}{dt}$ , устанавливающей связь между средней температурой воздуха  $T_m$  и процессами циркуляции.

Применим теорему ускорения циркуляции Бьеркнеса в форме

$$\frac{dC}{dt} = -R \oint_S T d \ln p, \quad (1)$$

где  $R$  – газовая постоянная, к контуру  $L$  термодинамического солениода (рис. 1), образуемого двумя разнородными потоками воздуха со средними температурами  $T_h$  и  $T_c$  ( $T_h > T_c$ ) в слое атмосферы  $P_0, P$  изобарических поверхностей.

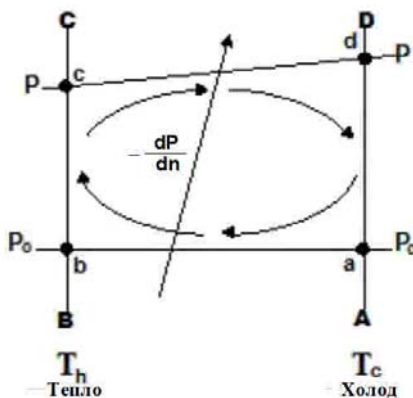


Рис. 1. Термодинамический солениод.

Получим выражение для  $dC/dt$  по указанному замкнутому контуру. Для этого, принимая во внимание, что сумма потоков вдоль внешних границ равна циркуляции вдоль замкнутой кривой, рассмотрим сумму интегралов на отрезках  $bc$ ,  $cd$ ,  $da$ ,  $ab$ , образующихся пересечением плоскостей  $AD$  и  $CB$  уровней  $P_0$  и  $P$  (рис. 1):

$$\frac{dC}{dt} = -R \oint_L T d \ln p = -R \left[ \int_b^c T_h d \ln p + \int_c^d \frac{T_h + T_c}{2} d \ln p + \int_d^a T_c d \ln p - \int_a^b \frac{T_h + T_c}{2} d \ln p \right]. \quad (2)$$

В правой части (2) второй и четвертый интегралы взаимно уничтожаются, так как энергия не изменяется при движении по одной той же изобарической поверхности. Принимая во внимание, что  $\frac{P_b}{P_c} = \frac{P_a}{P_d} = \frac{P_o}{P}$ , окончательно, после взятия интегралов, (2) запишется в виде

$$\frac{dC}{dt} = R(T_h - T_c) \lg \frac{P_o}{P} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]. \quad (3)$$

Таким образом, энергия циркуляции  $dC/dt$  является явной функцией разности температур двух разнородных потоков воздуха. Рассмотрим выражение (3) в климатологическом аспекте. Для этого были использованы данные реанализов (<http://meteolab.ru/ru/edu/linux/geanalysis/>) с шагом 2,5 градуса по долготе и широте по земному шару, представляющие средние для каждого дня года значения приземной температуры и геопотенциальных высот на уровнях 1000 и 500 гПа за период с 1981 по 2010 год.

Алгоритм расчета планетарной энергии циркуляции включает задание двух широт: «северной» и «южной» – широт «холода» и «тепла». Для заданных широтных зон рассчитывались величины  $dC/dt$  по долготе с шагом 2,5 градуса по средним для каждого дня года значениям геопотенциальных высот на уровнях 1000 и 500 гПа. Численные эксперименты выполнены для Северного и Южного полушарий на основе средней температуры слоя, рассчитанной по данным геопотенциала на соответствующих уровнях атмосферы. Сопряженные широты задавались с учетом преобладающих в климатическом аспекте воздушных потоков, обусловленных разностью температур: между экватором и полюсами, между широтами 80–65° в обоих полушариях – широтная зона пониженного давления, 65–35° – широтная зона повышенного давления, и 35–0° – широтная зона пониженного давления.

Годовой ход энергии циркуляции для выделенных широтных зон, обусловленный приходно-расходной частью кинетической энергии генерируемой работой «термодинамической машины» первого и второго рода [5], обнаруживает ряд важных различий между двумя полушариями. Наиболее ярко эти различия проявляются для годового хода энергии циркуляции, вычисленной с использованием средней температуры слоя по сопряженным широтам 80° и 0° обоих полушарий (рис. 2). Особенности этого различия в следующем.

**В Северном полушарии** с апреля по октябрь климатическое распределение энергии циркуляции как функции долготы достаточно гладкое с минимумом в июле и максимумом в октябре в соответствии с минимальным контрастом температур летом и значительным – в осенний период. В холодный период (ноябрь – январь), когда контрасты

температуры в рассматриваемой широтной зоне достигают максимума, отмеченная «гладкость» энергии циркуляции, свойственная указанным месяцам года, несколько нарушается с тенденцией выделения диапазона долгот с максимальными значениями.

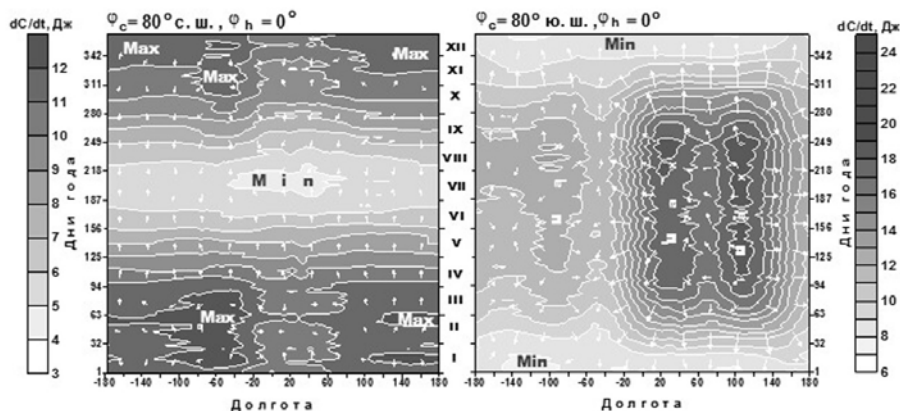


**Рис. 2.** Годовой ход климатической энергии циркуляции в Северном и Южном полушариях как функции долготы и времени года, рассчитанной по данным средней температуры слоя. Стрелки – градиент энергии циркуляции на соответствующей долготе данного дня года, вычисленный по восьми ближайшим узлам сетки.

**В Южном полушарии** пространственно-временное распределение энергии циркуляции противоположно таковому Северного полушария. Весьма наглядно это можно видеть, помимо рис. 2, на рис. 3, где приведены поверхности энергии циркуляции для двух сопряженных широт полюс – экватор как функции времени и долготы для обоих полушарий. Отметим, что в среднем интенсивность циркуляции в Южном полушарии в два раза больше, чем в Северном полушарии.

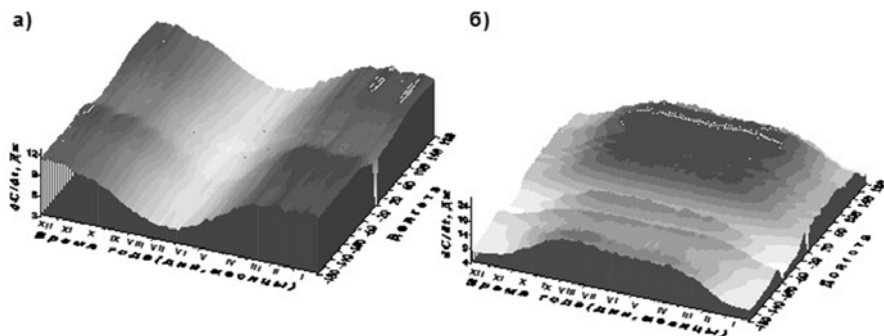


**Рис. 3.** Поверхность энергии циркуляции в Северном (а) и Южном (б) полушариях как функции времени и долготы.

Существенное же различие пространственно-временного распределения энергии циркуляции в обоих полушариях – это значительное различие в изменчивости  $dC/dt$  при фиксированном значении оси времени: в Северном полушарии изменчивость энергии циркуляции как функции долготы незначительна, в то время как в Южном полушарии – высокая.

На рис. 4 приведена дисперсия энергии циркуляции для обоих полушарий, рассчитанная для каждого дня года с шагом 2,5 градуса по долготе. В среднем, в Южном полушарии изменчивость  $dC/dt$  по долготе превышает аналогичную в Северном полушарии в семь раз.

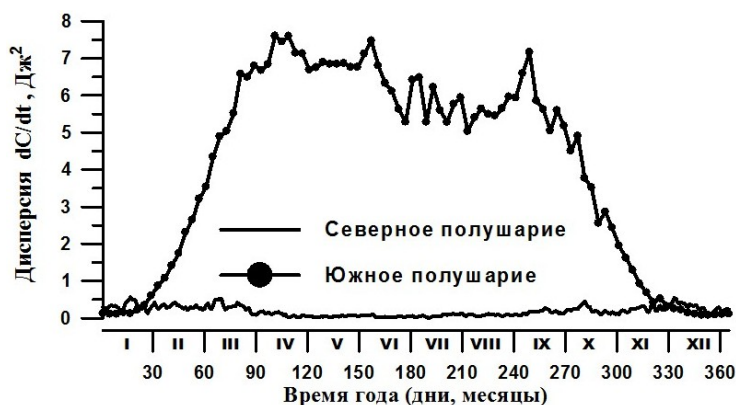


**Рис. 4.** Дисперсии энергии циркуляции, рассчитанная по долготам для каждого дня года.

Другая отличительная особенность пространственно-временного распределения энергии циркуляции в Южном полушарии – наличие двух долготных зон с различной по интенсивности энергией циркуляции: от 20° з. д. на восток до 180° и от 20° з. д. на запад до 180°. Как видно из рис. 3 б, энергия циркуляции в первой долготной зоне заметно больше, чем во второй, и они разделены минимумом  $dC/dt$  с небольшим долготным диапазоном (2–4°). В свою очередь, вторая долготная зона подразделяется на три области, разделенные между собой долготными полосами 80–108° з. д. и 130–140° з. д. с минимумом  $dC/dt$ . Таким образом, в целом в Южном полушарии укладываются две волны энергии циркуляции по замкнутому кругу широты с длинами волн в пропорции с запада на восток ~1:2.

Практическое отсутствие волнообразного характера энергии циркуляции в зональном направлении в Северном полушарии – результат относительно равномерного распределения преобладающей над Южным полушарием суши (39 %).

По мере сужения задаваемых сопряженных широт различие между двумя полушариями в пространственно-временном распределении энергии циркуляции как функции долготы уменьшается (из-за экономии места рисунки не приводятся). Данная особенность объясняется уменьшением разности контрастов температур сопряженных широт в обоих полушариях при сужении в них широтных зон.

В климатологическом аспекте уравнения для кинетической энергии на единичную массу зонального ( $K_\varphi$ ) и меридионального ( $K_\lambda$ ) движений в геострофическом приближении можно записать в виде:

$$\frac{dK_\varphi}{d\varphi} = -uv \left( l + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) - \frac{vg}{a} \frac{\partial H}{\partial \varphi}; \quad (4)$$

$$\frac{dK_\lambda}{d\lambda} = uv \left( l + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) - \frac{ug}{a} \frac{\partial H}{\partial \lambda}; \quad (5)$$

где  $u = \frac{g}{l \cdot a} \cdot \frac{\partial H}{\partial \varphi}$ ,  $v = -\frac{g}{l \cdot a \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{\partial H}{\partial \lambda}$  – зональная и меридиональная

составляющие ветра ( $u > 0$  при западном ветре,  $v > 0$  при северном ветре) соответственно;  $l = 2\omega \sin \varphi$  – параметр Кориолиса ( $\omega$  – угловая скорость вращения Земли);  $H$  – геопотенциальная высота;  $\varphi$  – широта,  $a$  – радиус Земли. Различие знаков у идентичных членов в (4) и (5) показывает на преобразование зональной энергии в меридиональную и наоборот.

Выполнив интегрирование по широтной зоне для рассматриваемого слоя атмосферы, получим выражение общей генерации кинетической энергии  $K_m = (u^2 + v^2) / 2$  среднего потока в слое – мощность потока, Вт:

$$K_m = \frac{2\pi a}{g} \int_{P_0}^P dP \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} v \frac{\partial H}{\partial \varphi} \cos \varphi d\varphi = -2\pi \frac{\omega a^2}{g} \int_{P_0}^P dP \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} v u \sin 2\varphi d\varphi. \quad (6)$$

Вводя среднюю температуру слоя  $T_m = H_{1000}^{500} / 2,029$ , выражая  $\partial H / \partial \varphi$  через  $u$ , используя барометрическую формулу, раскрыв выражение (6), получим:

$$K_m = -\frac{3}{2} \pi \frac{\omega a^2}{10^2 \cdot g} [\cos 2\varphi \cdot (1 - 2uv) + \sin 2\varphi \cdot (u + v)] \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2}. \quad (7)$$

Результаты расчета общей генерации кинетической энергии в двух полушариях приведены на рис. 5. Пространственно-временное распределение энергии циркуляции (рис. 2) и мощности потока (рис. 5) находятся в полном согласии, что является очевидным результатом, так как

уравнение прихода-расхода кинетической энергии получено из рассмотрения крупномасштабной циркуляционной системы, кинетическая энергия которой определена кинетической энергией горизонтальных движений.

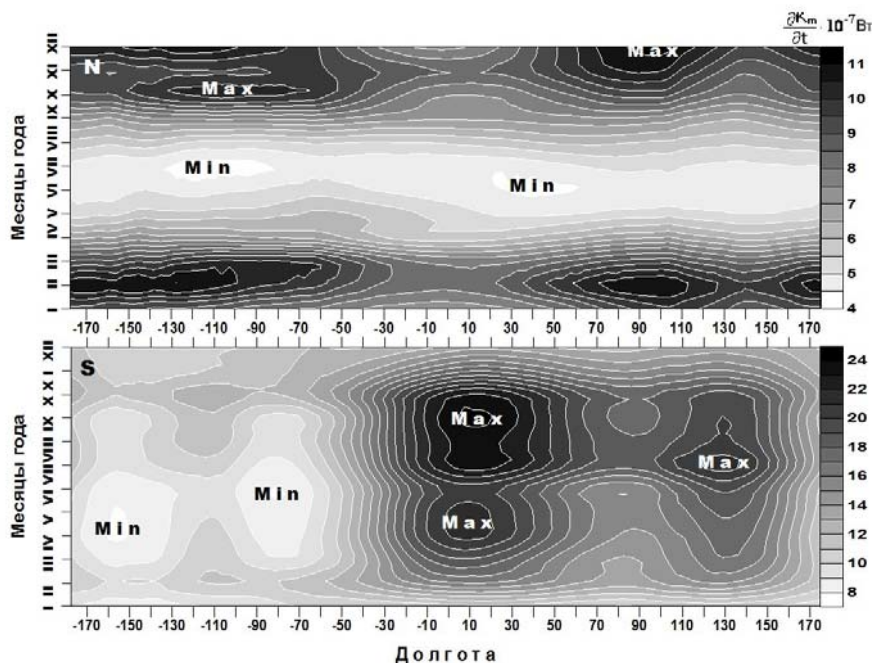


**Рис. 5.** Генерация климатической кинетической энергии (мощность потока) в слое 1000–500 гПа в Северном (N) и Южном (S) полушариях, рассчитанная по среднемесячным данным геопотенциала на соответствующих уровнях.

### Заключение

Вопросы общей циркуляции атмосферы имеют давнюю историю (Хэдли, Дове, Мори, Феррел, Бьеркнес, Бергерон и др.), на первом этапе носящие умозрительный характер, а позже основанные на анализе уравнений динамики, не нашли полного ответа до настоящего времени. Необходимым (явное не противоречие законам физики и согласование хотя бы в общих чертах с натурными наблюдениями), но не достаточным условием тех или иных схем общей циркуляции атмосферы на основе уравнений динамики является их не противоречие соотношениям баланса [1]. Всем схемам общей циркуляции атмосферы, имеющим давнюю историю, свойственно наличие зональной симметрии относительно экватора с областями, разделенные тропиком Рака в Северном полушарии и Козерога – в Южном. В [1] одной из групп классификации характерной для процессов общей циркуляции атмосферы

Э. Лоренц выделяет «свойства, которые проявляются с наибольшей полнотой, когда переменные усреднены по времени и долготе». Однако, как показали результаты, полученные в данной работе, изменчивость по долготам и пространственная ориентация энергии циркуляции как функции времени в слое 1000–500 гПа в Южном полушарии сильно отлична от таковой Северного полушария, что противоречит общепринятой картине ее зональной симметрии относительно экватора.

*Поступила в редакцию 12.09.2017 г.*

#### Список использованных источников

1. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 258 с.
2. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 398 с.
3. Петерсен С. Анализ и прогноз погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 652с.
4. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 393 с.
5. Шулейкин В.В. Строение поля тропического урагана // Доклады АН СССР. 1976. Т. 186, № 3. С. 578-582.
6. Bjerknes V. Über die Bildung von Circulationsbewegungen und Wirbeln in reibungslosen Flüssigkeiten // Skr. Nor. Vidensk. Akad. Kl. I: Mat.–Naturvidensk. 1898. P. 1-29.
7. Helmholtz H. Über Integral der hydrodynamischen Gleichungen Welche den Wirbelbewegungen entsprechen // J. Reine Angew. Math. 1867. Vol. 55. P. 25-55.
8. Rossby C.G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semipermanent centers of action // J. Marine Res. 1939. Vol. 2. P. 38-55

#### SUMMARIES

**Specific features of the spacial-temporal distribution of the atmosphere circulation climatic energy in the Northern and Southern hemispheres /** Arushanov M.L., Zhumaev U. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 137-144.

Circulation features of a large-scale thermodynamic solenoid in the northern and southern hemispheres for the atmosphere layer 1000-500 hPa are considered. It is shown that the distribution of the climatic circulation energy, as a function of longitude and time, in the northern hemisphere is sufficiently «smooth» in longitude, while in the southern hemisphere, has a wave character. In the southern hemisphere two circulating energy waves are laid in the proportion of ~1:2.

*Keywords:* velocity circulation, velocity vortex, circulation energy, kinetic energy, flow power.

УДК 551.5

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ТЕРРИТОРИИ ИРАКА В ПЕРИОД 1979–2016 гг.

**Ю.П. Переведенцев, С.К. Аль-Маамури,  
К.М. Шанталинский, Т.Р. Аухадеев**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань  
ypereved@kpfu.ru*

Рассмотрены пространственно-временные изменения температуры воздуха, атмосферного давления и скорости ветра на территории Ирака. В качестве исходных данных послужили суточные данные реанализа ERA-Interim с разрешением  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  в период 1979–2016 гг. Особое внимание уделено анализу распределения температуры воздуха и массовой доли озона до высоты 64 км (0,1 гПа), что позволило оценить годовую и межгодовую изменчивость указанных параметров, определить степень тесноты вертикальных статистических связей между уровнями тропо-стратосферы и нижней мезосферы.

*Ключевые слова:* атмосферное давление, температура воздуха, линейный тренд, коэффициенты корреляции, озон.

### Введение

К числу основных экологических проблем в современный период относят климатические вызовы. Так, на Парижском совещании в 2015 г. было принято соглашение об ограничении выбросов парниковых газов в атмосферу, чтобы не допустить повышения средней глобальной температуры (СГТ) более чем на  $2^\circ\text{C}$ . Согласно данным Пятого оценочного доклада МГЭИК [9], за период 1880–2012 гг. СГТ повысилась на  $0,85^\circ\text{C}$  [9].

Ожидается, что к концу 21 столетия, согласно расчетам на климатических моделях, она может повыситься на  $1,5\text{--}4,5^\circ\text{C}$ , а в регионах этот процесс может происходить еще более интенсивно. Для многих стран, расположенных в засушливых регионах, эти изменения температурного режима окажутся весьма болезненными. К числу таких стран относится Ирак. Настоящая работа выполнена в развитие ранее опубликованной авторами статьи [5], посвященной анализу долгопериодных изменений температуры воздуха и атмосферного давления на территории Ирака и прилегающих к нему стран Ближнего Востока. Здесь главное внимание уделяется анализу изменений термодинамических параметров в тропо-стратосфере и нижней мезосфере в период 1979–2016 годов.

### **Исходный материал и методика расчетов**

В качестве исходного материала использовались суточные данные реанализа ERA-Interim с разрешением  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  на 26 изобарических поверхностях от 1000 до 0,1 гПа в период 1979–2016 гг. Основные сведения об исходном информационном продукте содержатся в [7]. Рассчитывались в узлах сетки на уровне моря многолетние средние месячные значения атмосферного давления, температуры воздуха, относительной влажности и скорости ветра, коэффициенты наклона линейного тренда, что позволило построить карты распределения указанных величин. На втором этапе исследования температура воздуха и величина массовой доли озона осреднялись по территории Ирака ( $30\text{--}35^\circ$  с. ш.,  $40\text{--}47,5^\circ$  в. д.) на 26 изобарических поверхностях. Вычислялись среднемесячные значения и их тренды, вертикальные коэффициенты корреляции. По методике, изложенной в [4], определялись характеристики низкочастотной изменчивости с периодом более 10 лет температуры воздуха и массовой доли озона, строились вертикальные разрезы многолетнего хода первых разностей низкочастотных колебаний температуры воздуха и массовой доли озона, осредненных по территории Ирака.

### **Распределение средних значений метеорологических величин на территории Ирака**

Распределение средней месячной температуры воздуха (ТВ) на территории Ирака по данным реанализа ERA-Interim (1979–2016 гг.) во многом определяется характером подстилающей поверхности (рис. 1). Так, в январе она убывает от  $14^\circ\text{C}$  (крайний юго-восток) до  $1^\circ\text{C}$  в гористой местности северной части Ирака, где изотермы сгущаются. В центральной части страны (Багдад) ТВ составляет  $10,5^\circ\text{C}$ . Гребень тепла направлен с юго-востока на северо-запад. В апреле происходит значительное повышение ТВ от  $27^\circ\text{C}$  в районе Басра (крайний юго-запад) до  $13^\circ\text{C}$  на крайнем севере. В центре температура повышается до  $23\text{--}25^\circ\text{C}$ , ось гребня тепла сохраняет свое направление. Заметно возрастает температура в западной части Ирака (Рутба) от  $7$  до  $20^\circ\text{C}$ . Максимальных значений ТВ достигает в июле, на всей территории страны она превышает  $30^\circ\text{C}$ , убывая с юго-запада от  $39$  до  $32^\circ\text{C}$  на крайнем севере Ирака. В октябре по-прежнему температурный фон высокий: на юго-западе  $29^\circ\text{C}$ , в центре  $\sim 27^\circ\text{C}$  и лишь на крайнем севере она опускается до  $18^\circ\text{C}$ . Амплитуда годового хода составляет порядка  $26^\circ\text{C}$  на юго-западе и  $28^\circ\text{C}$  на севере.

Распределение среднемесячных значений атмосферного давления в январе на территории Ирака на уровне моря определяется периферией области высокого давления, барическое поле размытое, на северо-востоке давление достигает 1021 гПа, а на западе в районе Рутба давление составляет 1019,4 гПа (рис. 2). В апреле с юго-востока на северо-запад вытянута ложбина низкого давления, в районе Багдада значение давления составляет  $\sim 1010$  гПа, оно несколько выше на северо-востоке ( $\sim 1013$  гПа). В июле барическая ложбина углубляется, и самое низкое значение наблюдается на крайнем юго-востоке (996,5 гПа). Ось ложбины простирается

с юго-востока на северо-запад рассматриваемой территории. В октябре фон атмосферного давления возрастает, но конфигурация изобар сохраняется. Давление на юго-востоке составляет 1011,5 гПа, а на крайнем севере достигает до 1015 гПа. Перепад давления в годовом ходе в районе Багдада составляет 21 гПа.

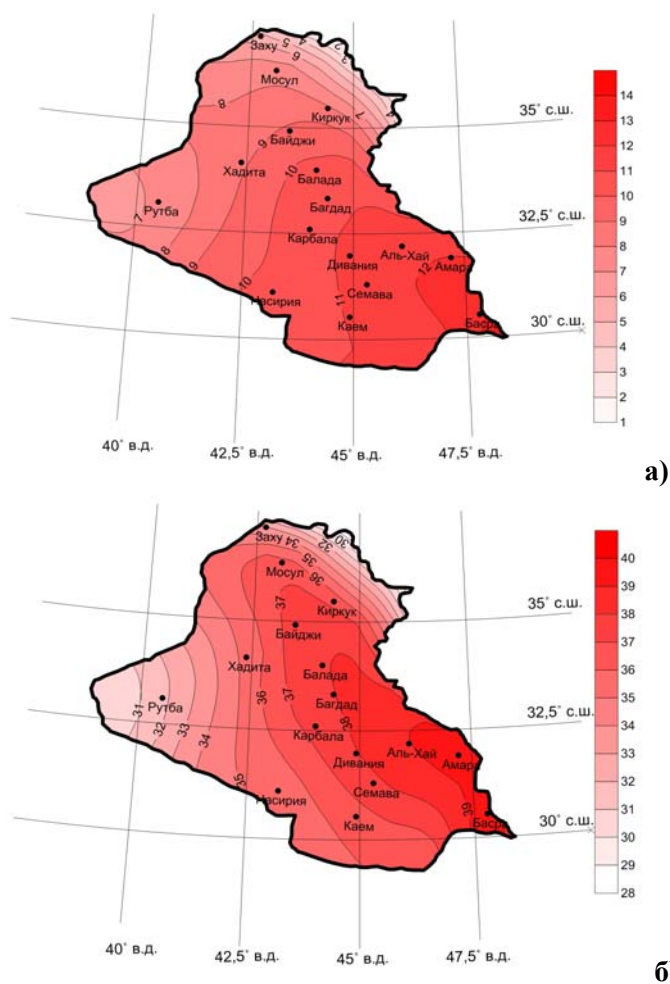


**Рис. 1.** Среднее месячное значение температуры воздуха, °С: январь (а); июль (б).

Средние многолетние значения скорости ветра испытывают небольшой годовой ход. В январе значения скорости ветра меняются по территории Ирака в пределах от 1,8 м/с (север) до 3,4 м/с (запад), в апреле от 2 до 3,6 м/с. В июле поле изоток перестраивается и скорость ветра заметно усиливается. Повсеместно она превышает 4 м/с, достигая на юго-востоке и северо-западе 5 м/с. В октябре наблюдается заметное снижение скорости ветра. Она падает от 3,3 м/с (юго-запад) до 1,7 м/с (север). Конвективная

неустойчивость в летний период усиливает скорость ветра у земли, что в свою очередь способствует возникновению пыльных бурь на иссушенной территории Ирака.

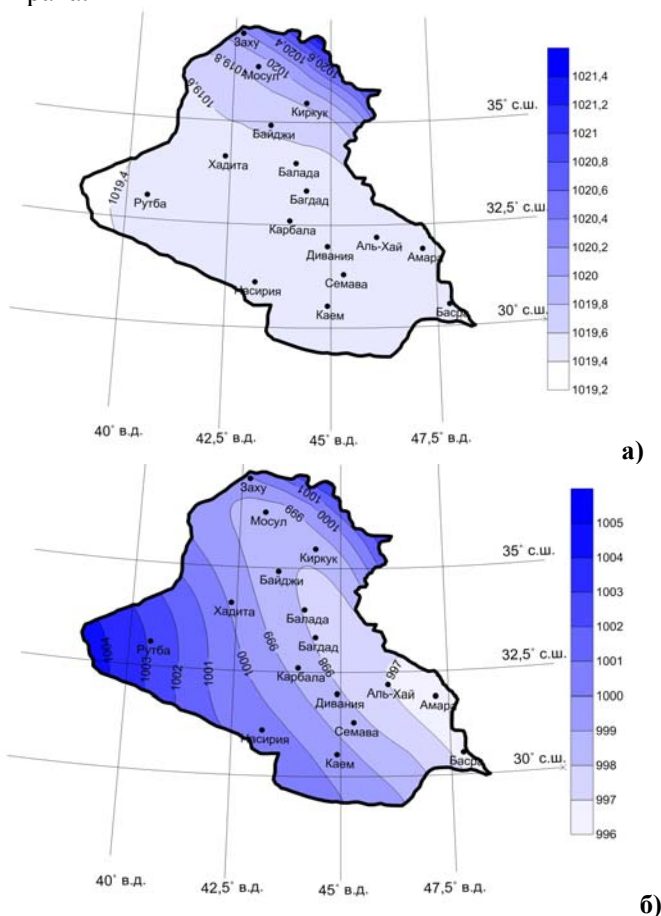


**Рис. 2.** Среднее месячное значение атмосферного давления на уровне моря, гПа: январь (а), июль (б).

Для выявления тенденций изменения метеовеличин во времени в период 1979–2016 гг. рассчитывались коэффициенты наклона линейного тренда (КНЛТ)  $\alpha$  для рядов температуры, давления, относительной влажности и скорости ветра. Рассмотрим долговременные тенденции изменения ТВ. В январе значения КНЛТ мало меняются по территории, повсеместно значение  $\alpha$  положительное и составляет  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет, лишь на западе в районе Рутбы  $\alpha = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет. В апреле значения величины  $\alpha$  немного возрастают и достигают максимальных значений на северо-востоке ( $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет), на остальной территории –  $\alpha \sim 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет. В июле прирост  $\alpha$  наблюдается с востока на запад от  $0,3$  до  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет. В октябре наблюдается наиболее сложная пространственная

распределения КНЛТ. Наиболее низкие значения  $\alpha$  на крайнем юго-востоке вблизи Басры ( $\sim 0,3$  °C/10 лет), на севере и западе  $\alpha$  достигают значений  $0,6$  °C/10 лет, а на небольшой территории на юго-западе  $\alpha = 0,7$  °C/10 лет. Таким образом, в поле температуры отмечается четко выраженная тенденция роста температуры воздуха в течение всего года, что усиливает засушливость региона.

Рассматривая карту распределения КНЛТ атмосферного давления в различные сезоны года, обнаруживается общая закономерность: атмосферное давление  $p$  на уровне моря повсеместно снижается. Так, в январе величина КНЛТ достигает значения  $-0,27$  гПа/10 лет на западе Ирака (в целом по Ираку КНЛТ колеблется в пределах от  $-0,12$  до  $-0,27$  гПа/10 лет). В апреле наибольшее падение  $p$  отмечается в центре и на севере страны ( $-0,32$  гПа/10 лет), в июле численные значения КНЛТ уменьшаются до  $-0,1$  гПа/10 лет, при этом наименьшая скорость падения отмечается в районе Басры ( $-0,05$  гПа/10 лет). В октябре скорость понижения давления возрастает, и КНЛТ меняются в пределах от  $-0,26$  до  $-0,36$  гПа/10 лет.

Численные значения КНЛТ скорости ветра также незначительны. Так, в январе КНЛТ меняется в пределах  $0,03$ – $0,06$  м/с/10 лет. В апреле на большей части территории наблюдается слабое понижение скорости ветра ( $\alpha = -0,02$  –  $-0,01$  м/с/10 лет) и лишь на севере скорость ветра растет ( $\alpha = 0,06$  м/с/10 лет). В июле на всей территории отмечается усиление скорости ветра. Величина  $\alpha$  достигает максимальных значений на юго-востоке ( $0,2$  м/с/10 лет) и на западе ( $0,1$  м/с/10 лет). На юге и севере, да и в центре Ирака усиление скорости ветра незначительно ( $\alpha = 0,05$  м/с/10 лет). В октябре на востоке наблюдается усиление скорости ветра ( $\alpha = 0,12$  м/с/10 лет), а на западе, наоборот, ослабление со скоростью  $-0,12$  м/с/10 лет. В центре скорость ветра во времени практически не меняется, а на севере она растет со скоростью  $0,04$  м/с/10 лет. Таким образом, во всех рассмотренных полях метеовеличин гористый север страны создает климатические условия, отличные от равнинных территорий.

### **Климатические изменения в Ираке от уровня земли до высоты 64 км**

Современные измерительные и вычислительные технологии позволяют анализировать атмосферные процессы до больших высот. Здесь рассмотрены особенности термического режима над Ираком в тропосфере, стратосфере и нижней мезосфере. Известно, что воздух в тропосфере нагревается от земной поверхности, в стратосфере нагревание происходит вследствие поглощения молекулами озона ультрафиолетовой радиации. И если в тропосфере температура воздуха понижается с высотой, то в стратосфере, наоборот, повышается, а в мезосфере снова понижается. Согласно [10], тропосфера, стратосфера и мезосфера имеют фундаментальные различия с точки зрения радиационного режима, вертикального распределения температуры, химического состава. В более ранних работах авторов [2, 3] рассматривалась динамика полей температуры воздуха и циркуляции

атмосферы в Северном полушарии, в работах [6, 8] исследовались структура и циркуляция стратосферы и мезосферы Северного полушария, корреляционные связи между параметрами нижней и средней атмосферы. Рассмотрим распределение ТВ, вертикального градиента температуры и массовой доли озона над Ираком.

В табл. 1 представлено распределение по вертикали низкочастотной изменчивости средних значений температуры воздуха, массовой доли озона и величины наклона линейных трендов температуры ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) и массовой доли озона ( $10^{-3} \text{‰}/\text{год}$ ) на 26 изобарических поверхностях.

**Таблица 1.** Характеристики низкочастотной изменчивости средних температур и массовой доли озона территории Ирака на 26 изобарических поверхностях

| P    | Январь                |            |       |            | Июль                  |            |       |            |
|------|-----------------------|------------|-------|------------|-----------------------|------------|-------|------------|
|      | $t, ^{\circ}\text{C}$ | $\alpha_t$ | S     | $\alpha_s$ | $t, ^{\circ}\text{C}$ | $\alpha_t$ | S     | $\alpha_s$ |
| 1000 | 12,31                 | 0,059      | 0,03  | 0,000      | 38,79                 | 0,016      | 0,04  | -0,001     |
| 925  | 8,60                  | 0,058      | 0,04  | 0,000      | 34,24                 | 0,011      | 0,08  | -0,001     |
| 850  | 4,82                  | 0,040      | 0,05  | 0,000      | 28,35                 | 0,010      | 0,11  | -0,001     |
| 700  | -3,27                 | 0,006      | 0,06  | 0,000      | 14,64                 | 0,013      | 0,13  | -0,001     |
| 600  | -10,35                | -0,004     | 0,07  | 0,000      | 5,68                  | 0,017      | 0,13  | -0,001     |
| 500  | -19,54                | -0,008     | 0,07  | -0,001     | -3,14                 | 0,005      | 0,13  | -0,001     |
| 400  | -31,09                | 0,000      | 0,08  | -0,001     | -12,66                | 0,000      | 0,13  | -0,001     |
| 300  | -44,66                | 0,013      | 0,12  | 0,000      | -26,79                | 0,015      | 0,13  | -0,001     |
| 250  | -51,00                | 0,024      | 0,16  | 0,000      | -35,83                | 0,029      | 0,13  | -0,001     |
| 200  | -55,03                | 0,032      | 0,23  | 0,001      | -46,77                | 0,027      | 0,14  | 0,000      |
| 150  | -58,46                | 0,010      | 0,34  | 0,001      | -60,55                | 0,012      | 0,16  | 0,000      |
| 100  | -64,94                | -0,020     | 0,77  | 0,000      | -74,70                | -0,006     | 0,34  | -0,002     |
| 70   | -65,72                | -0,045     | 2,08  | -0,001     | -72,68                | -0,028     | 1,40  | -0,007     |
| 50   | -63,01                | -0,048     | 4,27  | 0,002      | -62,77                | -0,041     | 3,33  | 0,005      |
| 30   | -57,98                | -0,056     | 7,92  | -0,003     | -53,94                | -0,033     | 6,75  | 0,051      |
| 20   | -53,84                | -0,066     | 10,34 | -0,015     | -48,65                | -0,024     | 10,74 | 0,035      |
| 10   | -46,26                | -0,023     | 12,50 | -0,023     | -40,63                | -0,024     | 15,03 | -0,026     |
| 7    | -39,86                | -0,075     | 12,29 | -0,005     | -35,55                | -0,011     | 14,86 | -0,021     |
| 5    | -32,37                | -0,133     | 11,47 | 0,023      | -29,36                | -0,035     | 13,66 | -0,002     |
| 3    | -22,61                | -0,125     | 9,24  | 0,041      | -19,49                | -0,088     | 9,96  | 0,018      |
| 2    | -17,25                | -0,039     | 7,15  | 0,020      | -14,62                | -0,065     | 7,44  | 0,011      |
| 1    | -14,07                | 0,103      | 4,55  | -0,005     | -10,68                | 0,079      | 4,88  | -0,005     |
| 0,8  | -14,22                | 0,119      | 3,88  | -0,006     | -10,49                | 0,109      | 4,27  | -0,006     |
| 0,51 | -17,00                | 0,124      | 2,95  | -0,005     | -14,84                | 0,112      | 3,54  | -0,005     |
| 0,29 | -24,80                | 0,119      | 2,08  | -0,002     | -26,34                | 0,064      | 2,61  | -0,003     |
| 0,1  | -39,87                | 0,074      | 1,12  | -0,001     | -48,28                | -0,029     | 1,37  | -0,001     |

*Примечание:*  $t$  – средняя многолетняя температура,  $^{\circ}\text{C}$ ; S – средняя многолетняя массовая доля озона ( $10^{-3} \text{‰}$ );  $\alpha_t$  – коэффициент наклона линейного тренда температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ );  $\alpha_s$  – коэффициент наклона массовой доли озона ( $\text{‰}/\text{год}$ ).

Как видно из таблицы, в январе и июле наблюдается понижение температуры в тропосфере и нижней стратосфере: в январе она уменьшается в слое 1000–70 гПа от 12,31 до -65,72 °С, а в июле от 38,79 до -74,70 °С в слое 1000–100 гПа. Летом происходит более значительное понижение температуры с высотой, чем зимой. Далее в январе в более высоких слоях стратосферы наблюдается инверсия температуры (в слое 50–1 гПа она повышается до -14,07 °С), а затем в нижней мезосфере вновь температура падает до значения -39,87 °С на уровне 0,1 гПа. В июле инверсия заканчивается на уровне 0,8 гПа ( $t = -10,49$  °С), затем наблюдается сильное понижение температуры воздуха до -48,28 °С на уровне 0,1 гПа. В летний период в стратосфере и мезосфере ТВ достигает более низких значений, однако в слое 50–0,51 гПа ее значения более высокие, чем в зимний, что свидетельствует о неоднородности термических процессов.

В целом и в январе, и в июле в тропосфере происходит повышение ТВ, о чем свидетельствуют положительные значения КНЛТ. При этом в слое 1000–150 гПа значения КНЛТ температуры воздуха в январе более значительны, чем в июле. Так, в январе на уровне 1000 гПа значения  $\alpha = 0,059$  °С/год, а в июле лишь 0,016 °С/год, что свидетельствует о более активных процессах в зимний период. В стратосфере от уровня 100 гПа до уровня 2 гПа как в январе, так и июле наблюдается отрицательный тренд температуры, происходит охлаждение стратосферы, что соответствует парниковой теории современного потепления климата. В нижней мезосфере наблюдается обратный процесс – КНЛТ  $> 0$  в январе в слое 1–0,1 гПа и в июле в слое 1–0,29 гПа. В целом в нижней мезосфере в январе скорость роста ТВ несколько превышает аналогичный показатель для лета. Следует отметить, что в январе в слое 5–0,29 гПа отмечаются наибольшие значения КНЛТ температуры воздуха всей рассматриваемой вертикали.

Анализ рис. 3 с многолетним ходом температур воздуха на территории Ирака на различных уровнях тропо-стратосферы и мезосферы показывает, что начиная с уровня 5 гПа наблюдаются хорошо выраженные долговременные колебания с периодом 8–10 лет температуры с большими амплитудами. Процессы в более высоких слоях атмосферы менее устойчивые, что не исключает влияния внешних воздействий со стороны гелио-геофизических факторов.

Распределение массовой доли озона ( $S$ ), рассчитываемой в  $10^{-3}$  промилле (‰), по вертикали (на 26 изобарических поверхностях) показывает, что в летней тропосфере в слое 1000–300 гПа концентрация озона более высокая, чем в зимней, однако в слое 250–30 гПа наблюдается обратная картина – в январе показатель массовой доли озона становится выше, чем в июле. В более высоких слоях атмосферы (20–1 гПа) массовая доля озона в июле становится больше, чем в январе. При этом максимальных значений концентрация  $O_3$  достигает в слое 20–5 гПа, где ее показатель выше 10. Следовательно, в июле за счет усиления потока ультрафиолетовой радиации происходит большая активизация фотохимических реакций образования озона, чем в январе.

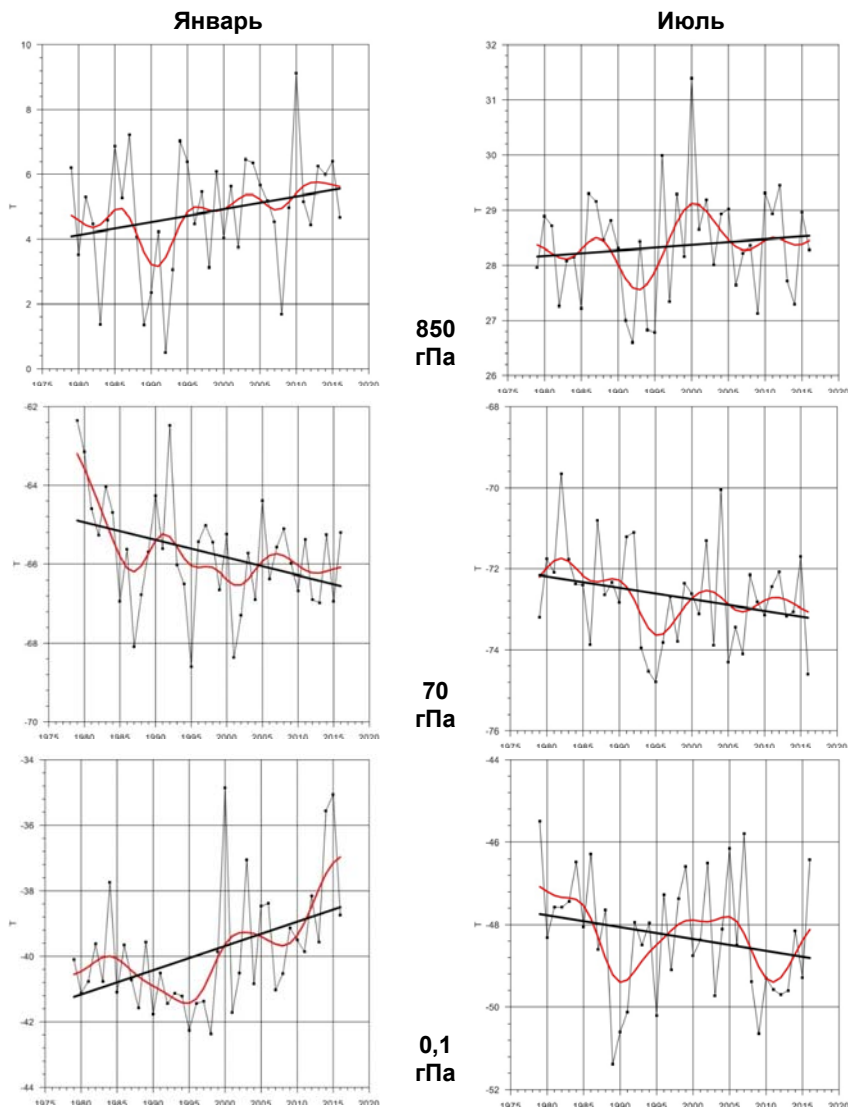


**Рис. 3.** Многолетний ход температуры воздуха на территории Ирака (30–35° с. ш., 40–47,5° в. д.). Исходный ряд, линейный тренд, НЧК с периодом более 10 лет.

Что касается долговременного изменения массовой доли озона в период 1979–2016 гг., то в тропосфере в июле она имеет отрицательный тренд, в слое 50–1 гПа есть определенная переменяемость в знаке тенденции: в слое 50–20 гПа отмечается рост, в слое 10–5 гПа падение, в слое 3–2 гПа рост и начиная с 1 гПа до 0,1 гПа, прослеживается отрицательная тенденция содержания озона. Все это свидетельствует о сложном механизме процессов в страто-мезосфере, где помимо фотохимических

факторов необходимо учитывать и динамические (циркуляционные и вертикальный обмен между слоями). В январе до уровня 100 гПа существенных изменений нет, лишь в нижней мезосфере наблюдается устойчивая отрицательная тенденция понижения массовой доли озона.

Анализ высотно-временных разрезов первых разностей низкочастотных компонент (НЧК) с периодом более 10 лет температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) в январе и июле показал, что в январе процессы протекают более активно, чем летом, особенно в слое 0–30 км (рис. 4). Очаги повышенных значений разностей НЧК ТВ в многолетнем разрезе ( $0,4^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) возникают в период 1980–1986 гг. в январе, а в июле картина достаточно спокойная, наблюдается плавное чередование областей с положительной и отрицательной тенденцией изменения ТВ. В январе в страто-мезосфере (с 30 км и выше) происходит чередование четко выраженных очагов с отрицательными и положительными значениями разностей.

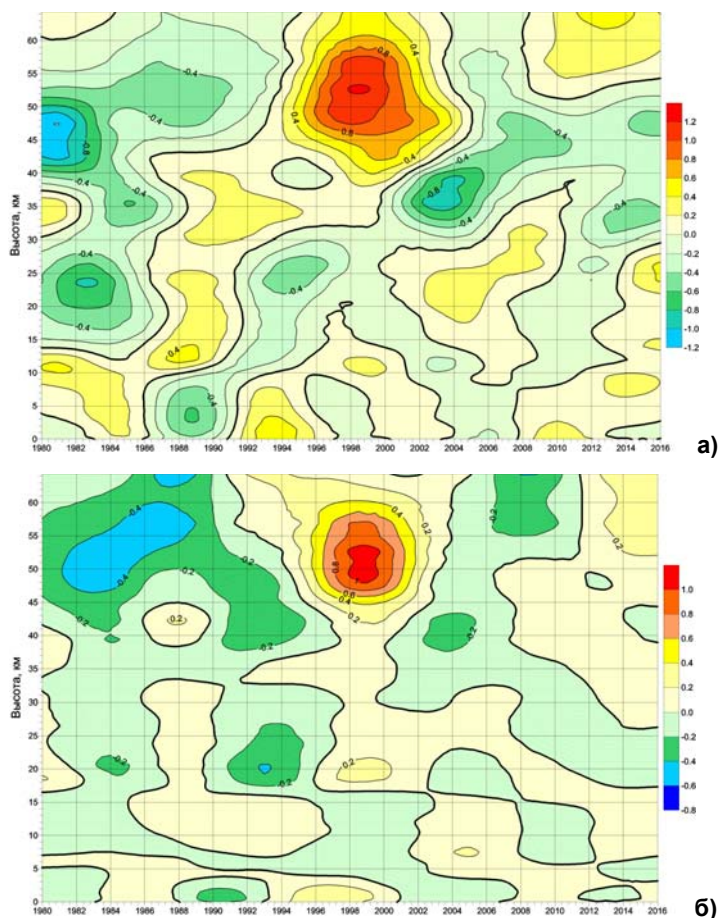


**Рис. 4.** Вертикальный разрез многолетнего хода первых разностей НЧК с периодом более 10 лет температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) осредненной по территории Ирака: январь (а); июль (б).

При этом следует отметить, что в июле колебания рассматриваемого параметра происходят примерно в те же годы. Так, в 1980–1994 гг. первые разности отрицательные, что свидетельствует о похолодании среды, а с 1994 по 2004 г. наблюдается значительное потепление в слое 40–64 км как в январе, так и в июле. Затем идет похолодание, и начиная с 2008 г. в январе, а в июле с опозданием в 4 года, началось потепление в верхних слоях. Следует однако отметить, что в январе картина более сложная (мозаичная), чем в июле. Что касается структуры аналогичного разреза для массовой доли озона, то здесь основные процессы происходят в слое 20–50 км (рис. 5), где наблюдается максимальная концентрация озона в озоносфере. Требуется специальное исследование для установления связей между характером поведения ТВ и  $O_3$ .

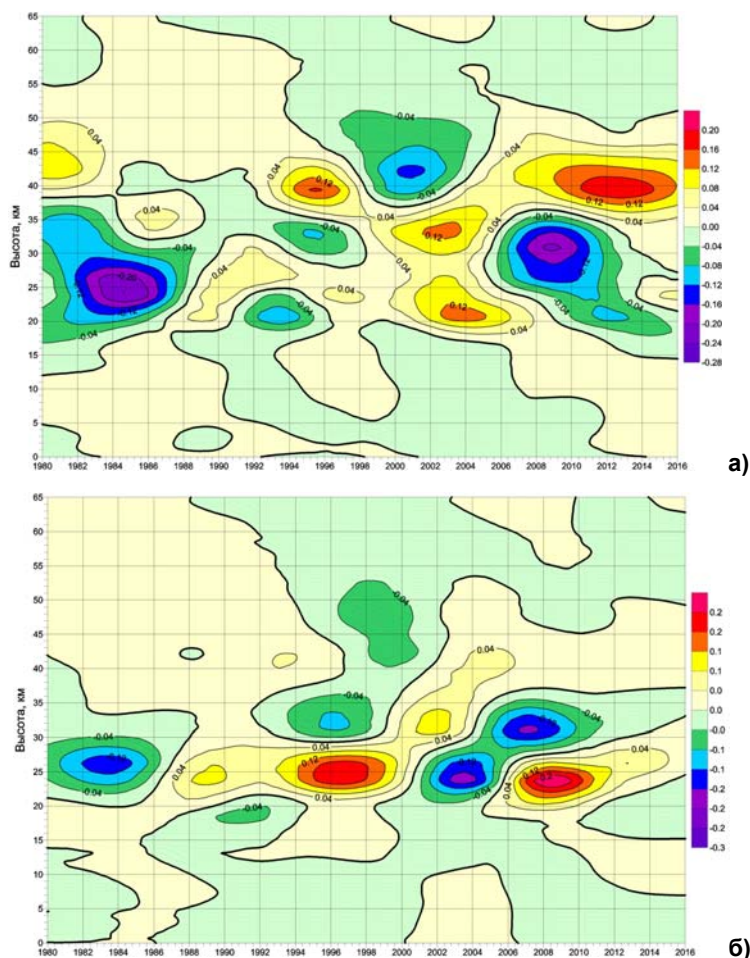


**Рис. 5.** Вертикальный разрез многолетнего хода первых разностей НЧК с периодом более 10 лет массовой доли озона (%), осредненной по территории Ирака: январь (а); июль (б).

Рассмотрены корреляционные связи между соседними изобарическими поверхностями в поле температуры в целом для года, января и июля (табл. 2). Как видно из данных табл. 2, в нижней тропосфере в слое 1000–850 гПа значения коэффициентов корреляции  $r$  независимо от времени года около 1, однако в июле в слое 850–400 гПа они заметно снижаются, особенно между уровнями 700 и 600 гПа ( $r = 0,35$ ). Выделяется слой тропопаузы 200–150 гПа, где вертикальные связи резко ослабевают, особенно в июле, когда между соседними уровнями 150 и 100 гПа  $r = 0,28$ . На стратосферных уровнях связи достаточно тесные, и они вновь ослабевают в области стратопаузы. Так, между уровнями 2 и 1 гПа в годовом измерении  $r = 0,31$ , в январе  $r = 0,59$  и в июле  $r = 0,17$ . В мезосфере корреляционные связи вновь усиливаются.

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции временных рядов ( $r$ ) осредненной по территории Ирака средней годовой, январской и июльской температур воздуха (1979–2016 гг.) на соседних изобарических поверхностях

| $P_n$ , гПа | $P_v$ , гПа | Год  |        |      |
|-------------|-------------|------|--------|------|
|             |             | Год  | Январь | Июль |
| Земля       | 1000        | 0,96 | 0,97   | 0,89 |
| 1000        | 925         | 1,00 | 1,00   | 1,00 |
| 925         | 850         | 0,99 | 0,98   | 0,99 |
| 850         | 700         | 0,94 | 0,93   | 0,62 |
| 700         | 600         | 0,93 | 0,98   | 0,35 |
| 600         | 500         | 0,95 | 0,99   | 0,84 |
| 500         | 400         | 0,96 | 0,95   | 0,72 |
| 400         | 300         | 0,87 | 0,65   | 0,73 |
| 300         | 250         | 0,90 | 0,81   | 0,93 |
| 250         | 200         | 0,81 | 0,79   | 0,96 |
| 200         | 150         | 0,48 | 0,70   | 0,81 |
| 150         | 100         | 0,45 | 0,59   | 0,28 |
| 100         | 70          | 0,88 | 0,88   | 0,48 |
| 70          | 50          | 0,91 | 0,88   | 0,79 |
| 50          | 30          | 0,85 | 0,87   | 0,85 |
| 30          | 20          | 0,86 | 0,90   | 0,94 |
| 20          | 10          | 0,44 | 0,15   | 0,64 |
| 10          | 7           | 0,80 | 0,83   | 0,81 |
| 7           | 5           | 0,81 | 0,92   | 0,85 |
| 5           | 3           | 0,80 | 0,79   | 0,78 |
| 3           | 2           | 0,72 | 0,58   | 0,94 |
| 2           | 1           | 0,31 | 0,59   | 0,17 |
| 1           | 0,8         | 0,99 | 0,98   | 0,99 |
| 0,8         | 0,51        | 0,99 | 0,91   | 0,96 |
| 0,51        | 0,29        | 0,99 | 0,92   | 0,93 |
| 0,29        | 0,1         | 0,83 | 0,81   | 0,57 |

Важным параметром атмосферы и климатической системы в целом является вертикальный температурный градиент  $\gamma$ , характеризующий статическую устойчивость атмосферы. От величины  $\gamma$  зависят условия реализации бароклинной неустойчивости и тем самым циклонической активности в атмосфере [1]. Расчеты величин  $\gamma$  между слоями показал, что в тропосфере в слое 1000–100 гПа они положительны в январе и июле и меняются в пределах 0,71–0,26 (январь) и 0,82–0,55 °C/100 м (июль), в слое 50–1 гПа в январе и в слое 70–1 гПа в июле отрицательны и затем вновь принимают положительные значения. Отметим, что на стратосферных уровнях вертикальные градиенты температуры значительно меньше по величине по сравнению с тропосферой. Значения КНЛТ невелики, преобладают положительные значения, однако в отдельных слоях, например в слое 2–0,8 гПа в июле, они отрицательны.

### Основные выводы

1. Исследована динамика пространственно-временных изменений полей температуры воздуха, атмосферного давления и скорости ветра у земли на территории Ирака в период 1979–2016 гг. по данным реанализа. Отмечается рост температуры воздуха в регионе.
2. Отмечается значительная пространственно-временная неоднородность в распределении термодинамических характеристик и озона, обусловленных различием физических механизмов, регулирующих термический режим в слоях атмосферы.
3. Происходит чередование знака КНЛТ температуры воздуха по вертикали в соответствии с теорией глобального потепления климата: в тропосфере температура растет, в стратосфере понижается.
4. В верхней стратосфере и нижней мезосфере (45–60 км) отмечаются очаги роста или понижения температуры с цикличностью в 8–10 лет. В озоносфере аналогичный процесс происходит ниже – в слое 25–40 км.
5. Сравнение высотных результатов по Ираку с материалами, полученными для тропической и умеренной зон Северного полушария, приводит к выводу, что данные реанализа ERA-Interim объективно отражают основные закономерности динамики климатических показателей в регионе.

*Поступила в редакцию 20.10.2017 г.*

### Список использованных источников

1. Мохов И.И., Акперов М.Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связи с приповерхностной температурой по данным реанализа // Известия РАН. ФАО. 2006. Т. 42, № 4. С. 467–475.
2. Переведенцев Ю.П., Гоголь Ф.В., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Динамика полей температуры воздуха Северного полушария в современный период // Проблемы анализа риска. 2007. Т. 4, № 1. С. 73–80.

3. *Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В. и др.* Теория общей циркуляции атмосферы. Казань: Казан.ун-т, 2013. 224 с.
4. *Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Важнова Н.А.* Пространственно-временные изменения основных показателей температурно-влажностного режима в Приволжском федеральном округе // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 4. С. 32-48.
5. *Переведенцев Ю.П., Аль-Маамури С.К., Аухадеев Т.Р.* Термобарический режим Ирака за период 1948-2013 гг. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2016. Т. 158. Кн. 1. С. 148-159.
6. *Тарасенко Д.А.* Структура и циркуляция стратосферы и мезосферы Северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 287 с.
7. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. No. 137. P. 552-597.
8. *Fahrutdinova A.N., Perevedentsev Yu.P., Guryanov V.V., Kulikov V.V.* Dynamical processes and correlations at midlatitudes in the lower and middle atmosphere // *Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin)*. 2001. T. 27, No. 10. P. 1667-1672.
9. *IPCC Report. The Physical Science Basis*, 2013. Cambridge Univ. Press, 2013. 2216 p.
10. *Mohanakumar K.* Stratosphere-troposphere Interactions // Springer. 2008. 416 p.

## SUMMARIES

**Spacial-temporal changes of climatic characteristics on the territory of Iraq in the period 1979-2016** / Perevedentsev Y.P., Al-Maamuri S.K., Shantalinskiy K.M., Auhadeev T.R. // *Proceedings of Hydrometcentre of Russia*. 2017. Vol. 366. P. 145-157.

Considered are spacial-temporal variations in air temperature, atmospheric pressure and wind speed in Iraq. Initial data were the daily data of ERA-Interim reanalysis with a resolution of  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  in the period 1979–2016. Particular attention is paid to the analysis of the distribution of air temperature and the mass fraction of ozone up to a height of 64 km (0,1 hPa), which made it possible to estimate the annual and interannual variability of these parameters and determine the degree of tightness of vertical statistical links between the tropospheric and lower mesosphere levels.

*Keywords:* atmospheric pressure, air temperature, linear trend, correlation coefficients, ozone.

УДК 551.5

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КЛИМАТИЧЕСКОЙ УЯЗВИМОСТИ ТЕРРИТОРИИ НА ОСНОВЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ

***В.В. Оганесян***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г.Москва  
vog@metcom.ru*

Проведена оценка климатической уязвимости территории вдоль 55 параллели от 24 до 78 градусов восточной долготы. Расчет климатической уязвимости производился путем перехода к безразмерным климатическим индексам, в состав которых включены не только экстремумы температуры, но и данные по осадкам и ветру. С этой целью исследованы локальные экстремумы температуры воздуха, осадков и ветра на 11 наблюдательных станциях. Период наблюдений охватывал около 130 лет. Полученные значения индексов могут быть использованы при долгосрочном планировании мер адаптации к изменениям климата, экологических мероприятий, крупномасштабном строительстве объектов инфраструктуры.

*Ключевые слова:* температура воздуха, осадки, ветер, экстремумы, климатические индексы, климатическая уязвимость.

### **Введение**

Происходящее в настоящее время глобальное потепление климата продолжает находить подтверждение в данных наблюдений. По данным Росгидромета, на территории России в последние десятилетия потепление климата происходило быстрее и масштабнее, чем на остальной части земного шара. Так, скорость современного роста глобальной температуры составила около 0,2 °С за 10 лет [7]. На территории России температура растет значительно быстрее: около 0,45 °С за 10 лет, особенно быстро в полярной области, где скорость роста достигает почти 1 °С за 10 лет [8]. Следствием наблюдаемого глобального потепления является увеличение изменчивости и экстремальности климата во многих регионах, в том числе и в России. Статистика последних лет свидетельствует о растущем во всем мире ущербе от опасных погодных и климатических явлений. По данным этой статистики, 90 % самых тяжелых экономических потерь приходится на наводнения, засухи, град, грозы и другие опасные гидрометеорологические явления (ОЯ). За период 1990–2000 гг. на территории Российской Федерации ежегодно фиксировалось 150–200 ОЯ (<http://www.meteorf.ru/>). В последующие годы их число уже было 250–300 в год, а начиная с

2007 года в среднем один раз в два года число ОЯ превышало 400 в год (рис. 1). При этом примерно половина наблюдаемых ОЯ приносит социально-экономический ущерб.

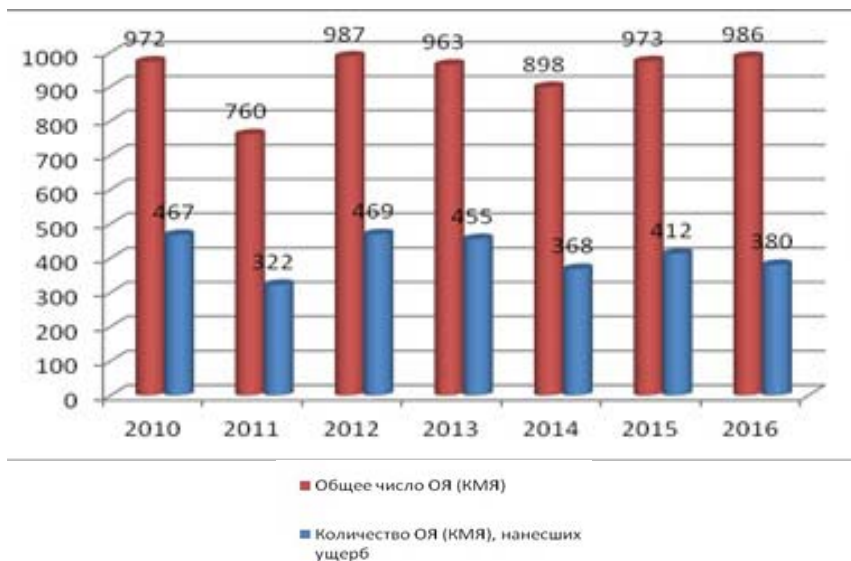


**Рис. 1.** Количество опасных гидрометеорологических явлений на территории Российской Федерации за период 2010–2016 гг.

Эффективные меры по предотвращению и сокращению ущерба от экстремальных погодных явлений зачастую требуют существенно большей заблаговременности, нежели индивидуальные оперативные прогнозы погоды, ограниченные теоретическим пределом предсказуемости. Для принятия действенных упреждающих мер адаптации требуются долгосрочные планы действий, основанные на научно обоснованных перспективных оценках изменения климата, включая оценки изменения статистики экстремальных погодных явлений. Подобные оценки могут быть проведены с помощью различных климатических индексов и их производных. Согласно данным последнего отчета Международного энергетического агентства [1], в 2010 году спрос на энергоресурсы вырос на 5 % по сравнению с предыдущим годом, при этом выбросы парниковых газов выросли на 5,9 %. Существует большая вероятность того, что средняя годовая температура Земли повысится более чем на два градуса по сравнению с доиндустриальным периодом.

### Изменения климата и их последствия

Последствия изменения климата ощущаются практически во всех странах, и перед правительствами этих стран стоит задача минимизировать их негативные воздействия, в частности организовывать мероприятия

по адаптации к меняющимся условиям, которые могут быть направлены как на снижение климатических рисков, так и на извлечение потенциальных выгод от изменения климата.

Примерами таких действий являются более экономное использование дефицитных водных ресурсов, изменение существующих строительных норм с расчетом на устойчивость зданий к воздействию будущих климатических условий и экстремальных погодных явлений, строительство защитных дамб от наводнений, повышение уровня существующих дамб для защиты от растущего уровня морей, создание засухоустойчивых культур, селекция лесной флоры и разработка методов ведения лесного хозяйства, которые приведут к снижению уязвимости от ураганов и пожаров.

Заблаговременные действия могут принести заметную экономическую выгоду и свести к минимуму последствия для экосистем, здоровья человека, экономического развития, собственности и инфраструктуры. Комплексный подход к разработке адаптационных мер, объединяющий науку, технологии и систему реагирования, будет способствовать снижению уязвимости общества и экономики стран к изменениям климата.

Многие страны, понимая важность этих мероприятий, ведут активную государственную политику, разрабатывают адаптационные стратегии как на секторальном (в секторах экономики), так и на региональном уровне (с учетом географических и природно-климатических особенностей региона).

Многие специалисты отмечают, что уязвимость экономики и общества на протяжении следующих 10–20 лет будет определяться социально-экономическими факторами и унаследованными проблемами, а именно удручающей экологической ситуацией и неудовлетворительным состоянием инфраструктуры, нежели изменением климата как таковым. Более теплый климат и обильные осадки в России открывают новые возможности для развития Северного морского пути (увеличение длительности перевозок) и сельского хозяйства (повышение урожайности зерновых) [4]. Однако отрицательные проявления изменения климата могут перевесить эффект от положительных.

В 2009 году Президент РФ утвердил Климатическую доктрину Российской Федерации, в которой содержатся принципиальные элементы, предусматривающие совершенствование системы наблюдений за климатом, оценки климатических рисков и разработку мер адаптации к последствиям изменения климата (<http://meteoinfo.ru/>).

Однако в Российской Федерации пока не существует единой государственной стратегии в области адаптации. Необходимо определить территории, производственные комплексы и группы населения страны, особо уязвимые к климатическим изменениям, а также разработать программные меры по смягчению последствий и адаптации к этим изменениям, включая создание финансовых и институциональных механизмов и технологий снижения климатических рисков.

Для разработки эффективной адаптационной политики в России необходимо разработать систему экономических оценок последствий изменений климата и оценок «затрат и выгод» принимаемых мер. Пока еще очень слаба законодательная база национальной адаптационной стратегии и подобных стратегий на уровне регионов или отдельных отраслей. Результаты долгосрочных прогнозов, построенных, главным образом, на математическом моделировании будущего климата, также расходятся как в тенденциях, так и в оценках.

### Методология определения воздействия климата на экономику

В основу настоящего исследования положено определение индекса уязвимости (Vulnerability index) [10]. Это метрический параметр, характеризующий уязвимость системы. Индекс климатической уязвимости обычно выводится посредством сочетания (со взвешиванием или без) нескольких показателей, которые, как предполагается, представляют уязвимость.

Воздействие (влияние) погоды требует выделить такие специфические показатели *погодозависимости* потребителя, как подверженность, чувствительность и уязвимость. *Подверженность* – степень открытости воздействию, определяемая спецификой работы потребителя. Это могут быть отдельные производственные объекты, их совокупности, комплексы (комбинаты), транспортные единицы, специфические или специальные работы, операции и т. п. Дать полную численную оценку метеорологической чувствительности сложно и вряд ли она может быть представлена в универсальном виде. Поэтому представляется возможным выразить этот показатель *погодозависимости* коэффициентом чувствительности, т. е. через отношение *предотвращенных потерь* к *издержкам*. Весь набор производственных и хозяйственных объектов в любой отрасли экономики в зависимости от технологической подверженности погоде может быть выражен мерой метеорологической чувствительности. Каждый из приведенных терминов имеет собственное содержание, отражающее определенную характеристику *погодозависимости*. Однако все же более обобщающим и значимым понятием следует рассматривать метеорологическую (климатическую) уязвимость. *Климатическая уязвимость* характеризуется той степенью, в которой изменение климата может нанести отдельному потребителю, определенному сектору или всей экономике в целом. Уязвимость рассматривается как достаточно сложная функция. Аргументами, определяющими факторами ее выступают следующие характеристики потребителя:

- 1) масштаб производственного объекта или комбинированной группы;
- 2) отраслевая технологическая специфика – различия очевидны в таких отраслях, как рыбопромысловый флот, авиация, нефтехимия, горная промышленность, сельскохозяйственное производство и многое другое;
- 3) степень защищенности (научное, организационное, финансовое и технологическое обеспечение защитных мероприятий);

4) региональные особенности производства (шельфовая зона, Севморпуть, Приморье, краснодарское Причерноморье, локальные особенности горной местности и др.). В региональном факторе уязвимости следует особо выделить местные ветры в горах, ураганы на Северном Кавказе, выход южных циклонов на Приморье, Сахалин, Камчатку и другие опасные метеоусловия. Необходимы исследования уязвимости в зависимости от особенностей макросиноптических процессов и региональных условий погоды. Абсолютная уязвимость является мерой погодозависимости. Относительная уязвимость есть отношение фактически наблюдавшихся метеорологических потерь ( $Y'$ ) к максимально возможным ( $L$ ). Необходимо учесть то обстоятельство, что *уязвимость* возрастает по мере роста *подверженности* данного типа объекта.

### Исходные данные

Чтобы исключить влияние широтного хода рассматриваемых метеоэлементов, использовались данные о температуре, осадках и ветре в 11 пунктах, расположенных вдоль 55 параллели. Были определены экстремумы температуры, осадков и ветра для каждого ряда и их средние многолетние значения (табл. 1).

**Таблица 1.** Расположение пунктов, экстремумы и средние значения температуры осадков и ветра

| Индекс станции | Название     | с.ш. | в.д. | Период наблюдений | Экстремумы |      |             |       | Средние значения |      |             |       |
|----------------|--------------|------|------|-------------------|------------|------|-------------|-------|------------------|------|-------------|-------|
|                |              |      |      |                   | Tmin       | Tmax | Осад-<br>ки | Ветер | Tmin             | Tmax | Осад-<br>ки | Ветер |
| 26477          | Великие Луки | 57,0 | 24,1 | 1881-2016         | -45,7      | 37,3 | 105,8       | 45    | 2,68             | 8,91 | 1,47        | 1,46  |
| 27595          | Казань       | 55,8 | 49,2 | 1881-2016         | -37,3      | 39,6 | 74,8        | 53    | 0,37             | 9,15 | 1,24        | 1,16  |
| 27612          | Москва       | 55,8 | 37,6 | 1948-2016         | -38,1      | 38,2 | 87,8        | 46    | 1,69             | 9,35 | 1,76        | 2,32  |
| 28411          | Ижевск       | 56,8 | 53,3 | 1958-2016         | -47,5      | 37,0 | 80,0        | 52    | -1,25            | 7,5  | 1,43        | 3,4   |
| 28434          | Красноуфимск | 56,6 | 57,8 | 1936-2016         | -53,6      | 37,3 | 61,6        | 51    | -3,40            | 6,9  | 1,5         | 3,01  |
| 28440          | Екатеринбург | 56,8 | 60,6 | 1881-2016         | -54,6      | 30,5 | 64,9        | 40    | -1,73            | 5,98 | 0,09        | 1,15  |
| 28493          | Тара         | 56,9 | 74,4 | 1936-2016         | -50,1      | 37,7 | 68,3        | 44    | -4,79            | 5,56 | 1,17        | 0,5   |
| 28661          | Курган       | 55,5 | 65,4 | 1893-2016         | -47,9      | 34,7 | 49,6        | 44    | -1,95            | 4,43 | 0,31        | 0,88  |
| 29430          | Томск        | 56,4 | 85,0 | 1881-2016         | -51,2      | 35,8 | 80,5        | 41    | 0,25             | 5,42 | 1,23        | 0,39  |
| 29574          | Красноярск   | 56,0 | 92,9 | 1914-2016         | -50,1      | 35,4 | 56,4        | 23    | 1,14             | 6,54 | 0,9         | 0,67  |
| 29612          | Барабинск    | 55,4 | 78,4 | 1900-2016         | -47,9      | 29,2 | 58,1        | 42    | -3,61            | 3,88 | 0,20        | 1,01  |

### Методика расчета индекса климатической уязвимости

Расчет климатической уязвимости производился путем перехода к безразмерным климатическим индексам. Этот метод был нами предложен в 2006 году и с тех пор широко применялся различными авторами [2, 3, 6], правда, без ссылки на первоисточник. Следует отметить, что при вычислении

безразмерного индекса для температуры возникали определенные трудности, когда средние значения были близки к нулю. Поэтому в данной работе использовалась следующая формула:

$$\frac{|Tmin| + |Tmax|}{|Tmin\text{ ср.}| + |Tmax\text{ ср.}|}, \quad (1)$$

где  $|Tmin|$  и  $|Tmax|$  модули значений экстремумов температуры;  $|Tmin\text{ ср.}|$  и  $|Tmax\text{ ср.}|$  – сумма модулей средних значений экстремумов температуры для данного пункта. Эта формула может служить показателем «континентальности», то есть суровости климата. Полная формула климатической уязвимости будет включать еще осадки и ветер:

$$V_i = \frac{|Tmin| + |Tmax|}{|Tmin\text{ ср.}| + |Tmax\text{ ср.}|} + \frac{Pmax}{Pсз} + \frac{Vmax}{Vср}. \quad (2)$$

Как видно, формула (2) состоит из суммы безразмерных показателей и представляет соответственно, безразмерное число, которое предлагается считать индексом климатической уязвимости. С помощью программы «Изограф», разработанной Ю.В. Алферовым, была построена карта распределения климатической уязвимости на территории России вдоль 55 параллели (рис. 2).

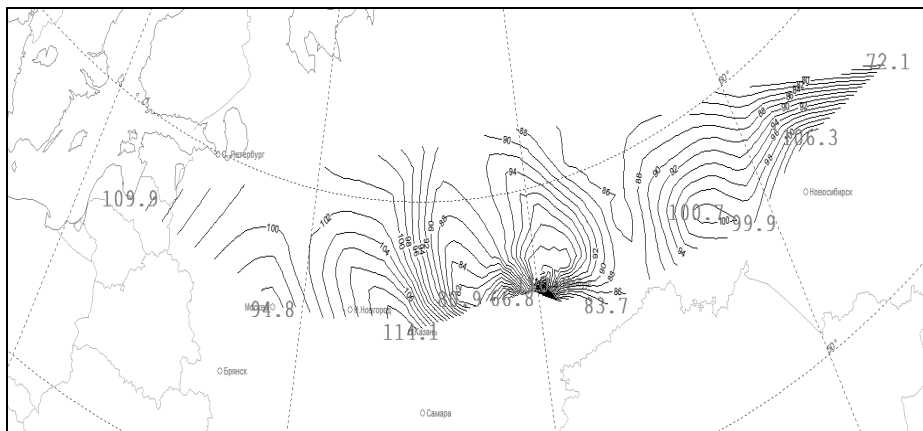


Рис. 2. Распределение индекса климатической уязвимости.

### Анализ полученных результатов

Как видно из представленных в табл. 3 и 4 результатов, безразмерный индекс климатической уязвимости для выбранных 11 пунктов меняется от 66,83 (Красноуфимск) до 114,12 (Казань), среднее значение 94,56. Наибольший вклад в индекс вносят осадки, максимальный показатель –

71,97 (Великие Луки), минимальный – 37,86 (Курган). Вторым по вкладу в безразмерный показатель идет ветер, наибольший показатель – 45,69 (Казань), наименьший – 9,67 (Красноярск). По степени суровости климата из рассмотренных пунктов наивысший показатель имеет Томск (15,34), наименьший – Москва (6,91). Из рис. 2 видно, что индекс климатической уязвимости с запада на восток меняется неравномерно, что, вероятно, соответствует особенностям крупномасштабной атмосферной циркуляции. Полученные индексы могут быть использованы при долгосрочном планировании мер адаптации к изменениям климата, экологических мероприятий, крупномасштабном строительстве объектов инфраструктуры.

**Таблица 3.** Индексы экстремальности температуры, осадков и ветра

| Индекс станции | Название     | Широта | Долгота | Индекс экстремальности  |                                 |                                 |
|----------------|--------------|--------|---------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                |              |        |         | Температура по ф-ле (1) | Осадки $\frac{P_{max}}{P_{сз}}$ | Ветер $\frac{V_{max}}{V_{ср.}}$ |
| 26477          | Великие Луки | 57,0   | 24,1    | 7,16                    | 71,97                           | 30,82                           |
| 27595          | Казань       | 55,8   | 49,2    | 8,11                    | 60,32                           | 45,69                           |
| 27612          | Москва       | 55,8   | 37,6    | 6,91                    | 49,88                           | 38,02                           |
| 28411          | Ижевск       | 56,8   | 53,3    | 9,66                    | 55,94                           | 15,29                           |
| 28434          | Красноуфимск | 56,6   | 57,8    | 8,82                    | 41,07                           | 16,94                           |
| 28440          | Екатеринбург | 56,8   | 60,6    | 11,04                   | 65,00                           | 34,78                           |
| 28493          | Тара         | 56,9   | 74,4    | 8,48                    | 58,38                           | 33,84                           |
| 28661          | Курган       | 55,5   | 65,4    | 12,95                   | 37,86                           | 32,91                           |
| 29430          | Томск        | 56,4   | 85,0    | 15,34                   | 65,45                           | 26,52                           |
| 29574          | Красноярск   | 56,0   | 92,9    | 11,13                   | 51,27                           | 9,67                            |
| 29612          | Барабинск    | 55,4   | 78,4    | 10,29                   | 48,42                           | 41,23                           |

**Таблица 4.** Индексы климатической уязвимости

| Индекс станции | Название     | Широта | Долгота | Индекс климатической уязвимости |
|----------------|--------------|--------|---------|---------------------------------|
| 26477          | Великие Луки | 57,0   | 24,1    | 109,95                          |
| 27595          | Казань       | 55,8   | 49,2    | 114,12                          |
| 27612          | Москва       | 55,8   | 37,6    | 94,81                           |
| 28411          | Ижевск       | 56,8   | 53,3    | 80,89                           |
| 28434          | Красноуфимск | 56,6   | 57,8    | 66,83                           |
| 28440          | Екатеринбург | 56,8   | 60,6    | 110,82                          |
| 28493          | Тара         | 56,9   | 74,4    | 100,71                          |
| 28661          | Курган       | 55,5   | 65,4    | 83,72                           |
| 29430          | Томск        | 56,4   | 85,0    | 106,31                          |
| 29574          | Красноярск   | 56,0   | 92,9    | 72,07                           |
| 29612          | Барабинск    | 55,4   | 78,4    | 99,94                           |

## Список использованных источников

1. Аверченков А.А., Галенович А.Ю., Сафонов Г.В., Федоров Ю.Н. Регулирование выбросов парниковых газов как фактор повышения конкурентоспособности России. М.: НОППУ, 2013. С. 88
2. Загребина Т.А. Уязвимость территории при возникновении опасных природных явлений // Международн. науч.-пром. форум «Великие реки». Н. Новгород, 2006. С. 354-359.
3. Калинин Н.А., Булгакова О.Ю., Дегтярева Л.А. Пространственное распределение комплексных критериев погодной изменчивости по территории Пермского Края и Удмуртской Республики // Вестник Удмуртского университета. 2012. Вып. 4. С. 97-103.
4. Кланцов В.М. Меры по адаптации к изменениям климата. Российский институт стратегических исследований. 13.12.2011. – <https://riss.ru/>
5. Климатическая доктрина Российской федерации: основные тезисы. 17.12.2009.
6. Кориунов. А.А. Погодно-климатические риски и их воздействие на экономику и население. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2013. – <http://www.meteo.ru>
7. Логинов В.Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. Минск: ТетраСистемс, 2008. 496 с.
8. Малинин В.М., Гордеева С.М. О современных изменениях глобальной температуры воздуха // Общество. Среда. Развитие. 2011. № 2. С. 215-221.
9. Экстремальные погодные явления возглавили список глобальных рисков. 16 января 2017 г. – <http://www.meteorf.ru/press/news/13145/>
10. Young E., Byers E., Hammerson G., Frances A., Oliver L., Treher A. Guidelines for using the NatureServe climate change vulnerability index. Release 3.0. Arlington, Virginia, USA: NatureServe, 2011

## SUMMARIES

**Methodology of assessment of climatic vulnerability of a region on the basis of nondimensional climatic indices** / Oganessian V.V. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 158-165.

Climatic vulnerability of a region along parallel 55 from 24° E to 78° E is estimated. To determine the region climatic vulnerability non-dimensional climatic indices were used, which comprised not only temperature extrema, but also data on precipitation and wind. The period of observations covered about 130 years. The obtained values of indices can be used for long-term planning of measures of adaptation to climate changes, ecology-related arrangements, construction of infrastructural facilities on a grand scale.

*Keywords:* temperature of air, precipitation, wind, extrema, climatic indexes, climatic vulnerability.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ журнала «Труды Гидрометцентра России»

1. Статья должна соответствовать тематике «Трудов Гидрометцентра России», быть оригинальным законченным научным исследованием, должна содержать сжатое и ясное изложение современного состояния вопроса, описание методики исследования, изложение и обсуждение полученных автором данных. Статья должна быть озаглавлена так, чтобы название соответствовало ее содержанию.

2. Статьи, поступающие в редакцию журнала, подлежат обязательному независимому рецензированию.

Порядок рецензирования рукописей представлен на сайте: <http://www.meteoinfo.ru/review-order>

3. Объем статьи, как правило, не должен превышать 20 страниц текста в формате Microsoft Word с полуторным интервалом, включая список использованных источников, таблицы, рисунки. Объем заказных статей определяется редколлегией.

4. Статья представляется в распечатанном виде с приложением электронной версии и рисунков в отдельных файлах в формате .jpg, .tif. (flash-накопитель). Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением .doc. В имени файла указывается фамилия автора.

5. Подписанная автором (авторами) на первой странице рукопись является оригиналом для печати. Вносить в корректуру статей значительные исправления и дополнения авторам не разрешается.

6. Редакция сохраняет за собой право делать необходимые редакционные исправления.

7. В комплект статьи должны входить:

- основной текст статьи
- УДК, соответствующий теме статьи;
- сведения об авторах (авторе): фамилия, имя, отчество полностью, учёная степень, должность, название организации, электронный адрес, контактный телефон. Для группы авторов необходимо указать, с кем вести переговоры и переписку;
- текст аннотации (не более 12 строк) на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках
- название статьи, фамилии и инициалы авторов на английском языке;
- иллюстративный материал в виде отдельных файлов в соответствии с нижеприведенными требованиями;
- список подрисуночных подписей;
- акт экспертизы (1 экз.).

5. Текст должен быть напечатан шрифтом Times New Roman 12 кеглем через полуторный интервал на листе форматом А4 с полями: нижнее, верхнее и левое – 25 мм, правое – 15 мм. Выравнивание по ширине. Абзацный отступ 1 см. Не допускается формирование абзацного отступа с помощью пробелов и табуляции. Все слова внутри абзаца разделяются одним пробелом.

Подзаголовки набираются отдельной строкой жирным шрифтом; могут быть пронумерованы или без нумерации (на усмотрение авторов).

Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом

(Па, Вт/м<sup>2</sup>, Дж/(кг·К) и т. д.). Между цифрой и единицей измерения вставляется один пробел; например 5 м/с, 3 %.

Пределы величин приводятся следующим образом: 17–20 мм, от 17 до 20 мм. Кавычки («...»). Не допускается использовать дефис (-) вместо знака тире (–); цифры 0 и буквы О в надстрочном написании в качестве символа градуса. Дробные части чисел отделяются от целых запятой, а не точкой.

6. *Таблицы* с заголовками размещаются на отдельных страницах после основного текста статьи. Ссылка на таблицу в тексте: в табл. 1. Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Таблицы следует создавать в режиме таблиц (вставить таблицу). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста (книжной или альбомной ориентации). Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы:

**Таблица 1.** Название таблицы

7. *Рисунки* должны быть представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В текст рисунки не вставлять. Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1.

Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах в графических форматах .jpg, .tif (для возможного их редактирования), должны быть четкими, с учетом последующего уменьшения. Все надписи на картах, рисунках, схемах, диаграммах должны быть на русском языке.

Оформление подписи рисунка (11 кегль):

**Рис. 1.** Название рисунка.

8. *Формулы* набираются только с использованием редактора формул Microsoft Equation Editor и имеют следующие размеры: обычный – 12, крупный индекс – 8, мелкий индекс – 6, крупный символ – 24, мелкий символ – 12. Латинские и греческие буквы – курсив; цифры – прямые. Возможно представление простых формул в тексте (не занимающих отдельную строку и не содержащих дробей) без редактора формул, при этом размеры символов в формулах должны соответствовать вышеперечисленным требованиям.

Простые формулы в тексте пишут через косую линию. Математические символы типа sin, ctg, arcsin, lg, max, числа Релея (Re), Россби (Ro) и др. набирают прямым шрифтом. Расшифровка символов формулы дается в той последовательности, в которой они употреблены в формуле.

Необходимо дать расшифровку всех используемых в статье параметров, включая подстрочные и надстрочные индексы, а также всех аббревиатур.

10. *Список использованных источников* должен быть пронумерован и упорядочен по алфавиту (вначале на русском языке, затем на иностранных). Список оформляется по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Ссылки в тексте приводятся в квадратных скобках [1, 2, 3–8].

11. В случае возвращения статьи автору для переработки датой поступления считается дата получения редакцией окончательного текста.

12. Плата с авторов, в том числе аспирантов, за публикацию рукописей не взимается.

**ТРУДЫ  
ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ  
Выпуск  
366**

Под редакцией  
д-ра геогр. наук В.М. Хан

---

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»  
Адрес: 123242 Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13  
Телефон: (499) 252-34-48, факс: (499) 255-15-82  
e-mail: [hmc@mecon.ru](mailto:hmc@mecon.ru)  
[www.meteoinfo.ru](http://www.meteoinfo.ru)

---

Подписано в печать 28.11.2017. Формат 70×100/16  
Печать офсетная. Печ. л. Тираж 300 экз. Заказ №  
Отпечатано в типографии «ТРИАДА ЛТД»  
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33  
тел./факс: (495) 617-11-98  
[www.triadalt.ru](http://www.triadalt.ru)