

Подписной индекс журнала по каталогу Агентства «Роспечать»
«Издания органов научно-технической информации» – 64291



ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации»

Выпуск 360 ТРУДЫ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

Федеральная служба
по гидрометеорологии
и мониторингу
окружающей среды



ТРУДЫ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ISSN 0371 – 7089

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

Гидрометеорологические прогнозы

**ТРУДЫ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(издается с 1947 года)

**Выпуск
360**

Под редакцией
д-ра геогр. наук И.Н. Кузнецовой,
канд. геогр. наук И.Ю. Шалыгиной

Москва, 2016

Редакционная коллегия

д-р техн. наук Р.М. ВИЛЬФАНД (главный редактор);
д-р геогр. наук А.А. ВАСИЛЬЕВ (зам. главного редактора);
д-р геогр. наук В.М. ХАН (ответственный секретарь);
д-р техн. наук М.В. БОЛГОВ; канд. геогр. наук С.В. БОРИЦ;
д-р физ.-мат. наук П.П. ВАСИЛЬЕВ; канд. техн. наук Л.Р. ВАРДАНИЯ;
д-р физ.-мат. наук Л.Р. ДМИТРИЕВА; д-р геогр. наук Н.А. ЗАЙЦЕВА;
д-р физ.-мат. наук А.Р. ИВАНОВА; д-р геогр. наук А.Д. КЛЕЩЕНКО;
д-р геогр. наук И.Н. КУЗНЕЦОВА; д-р физ.-мат. наук В.Ф. МАРТАЗИНОВА;
д-р физ.-мат. наук А.В. МУРАВЬЕВ; д-р геогр. наук Е.С. НЕСТЕРОВ;
д-р геогр. наук А.Н. ПОЛЕВОЙ; член-корр. НАН Украины А.Б. ПОЛОНСКИЙ;
д-р физ.-мат. наук Г.С. РИВИН; д-р физ.-мат. наук Ю.Д. РЕСНЯНСКИЙ;
акад. РАН А.С. САРКИСЯН; канд. геогр. наук А.И. СТРАШНАЯ;
д-р физ.-мат. наук М.А. ТОЛСТЫХ; д-р физ.-мат. наук Н.П. ШАКИНА

В сборнике представлены статьи, посвященные некоторым аспектам изменения климата и его последствий, а также исследованиям в области агрометеорологии и гидрологии. Показаны исследования по наукастингу в рамках реализации глобального аэронавигационного плана. Интересен подход к использованию радиолокационной информации для оценки опасных явлений, в частности града и ливневых осадков. Представлены результаты расчетов химической транспортной модели загрязнения воздуха в мегаполисе и исследования экстремально низкого содержания озона в атмосфере над севером Урала и Сибири.

Сборник представляет интерес для специалистов в области прогнозирования и мониторинга окружающей среды.

Proceedings of Hydrometcentre of Russia
Edited by I.N. Kuznechova, I.Y. Shalygina

This issue includes articles on some aspects of climate change and its impacts, as well as research in meteorology and hydrology. Showing a study on nowcasting. in the framework of the implementation of the global air navigation plan. Interesting the method to use of the radar information for hazard assessment, in particular, hail and torrential rain. Presents the results of calculations air pollution of chemical transport model in megacity and the study of extremely low total ozone over the North Urals and Siberia.

The collection of papers is meant for specialists in the area of forecasting, environmental monitoring and ecology.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Переведенцев Ю.П., Вильфанд Р.М., Шанталинский К.М.</i> Низкочастотные изменения атмосферного давления и приповерхностной температуры воздуха во внетропических широтах Северного полушария	5
<i>Тарасова Л.Л.</i> Оценка агрометеорологических показателей условий зимовки озимых зерновых культур в центральных черноземных областях в условиях климатических изменений	26
<i>Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В.</i> О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур	45
<i>Данова Т.Е., Прокофьев О.М.</i> Влагосодержание и влагоперенос в тропосфере Причерноморского региона в теплое полугодие	79
<i>Симонов Ю.А., Ликарь Э.-Л.Д., Фролова Н.Л.</i> Оценка применимости модели динамики снежного покрова SNOW-17 в практике оперативного гидрологического прогнозирования в России.....	95
<i>Иванова А.Р., Шакина Н.П.</i> Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации Глобального аэронавигационного плана (ГАНП)	113
<i>Алексеева А.А., Песков Б.Е.</i> Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации	135
<i>Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Коновалов И.Б., Березин Е.В.</i> Суточный ход загрязняющих воздух веществ по измерениям и расчетам химической транспортной модели	149
<i>Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лукьянов А.Н.</i> Озоновая «мини-дыра» над севером Урала и Сибири	168

CONTENTS

<i>Perevedentsev Y.P., Vilfand R.M., Shantilinskii K.M.</i> Low-frequency changes of atmosphere pressure and surface air temperature in the non-tropical latitudes of the Northern Hemisphere	5
<i>Tarasova L.L.</i> Assessment of agrometeorological indicators of conditions of wintering of winter grain crops in the central chernozem regions in the conditions of climatic changes.....	26
<i>Vilfand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V.</i> About the dynamics of the agroclimatic indicators of conditions of sowing, wintering and formation of the yield of the main grain crops.....	45
<i>Danova T.E., Prokofev O.M.</i> Moisture content and moisture transfer during the warm half of the year in the troposphere over the Black Sea	79
<i>Simonov Y.A., Licar E.-L.D., Frolova N.L.</i> Assessment of the SNOW-17 snow cover dynamics model potential usage in the operational hydrologic forecasting practice in Russia	95
<i>Ivanova A.R., Shakina N.P.</i> Future development of nowcasting for aviation meteorological service in the framework of Global aeronavigation plan (GANP) implementation	113
<i>Alekseeva A.A., Peskov B.E.</i> Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information	135
<i>Shalygina I.Y., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I., Konovalov I.B., Berezin E.V.</i> The comparison of diurnal variations of air pollutants using measurements and calculations of a chemical transport model ...	149
<i>Nikiforova M.P., Vargin P.N., Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Kuznetsova I.N., Lukyanov A.N.</i> Ozone «mini-hole» over the north of Ural and Siberia	168

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ВО ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Ю.П. Переведенцев², Р.М. Вильфанд¹, К.М. Шанталинский²

*¹Казанский (Приволжский) федеральный университет
²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
ypereved@kpfu.ru*

Введение

В данной статье главное внимание уделяется анализу пространственно-временного распределения приповерхностной температуры воздуха и атмосферного давления в период 1900–2014 гг. в широтной зоне 20–90° с. ш. в условиях современного глобального потепления климата.

Обобщающие материалы по проблемам изменения климата содержатся в [5, 20] и других научных изданиях. Безусловно, на первый план выходят вопросы, связанные с причинами изменений климата и ожидаемыми последствиями для природной среды и социума. В частности, в [3, 19] рассматривается вопрос о наличии альтернативы сценарию все ускоряющегося потепления климата из-за увеличения концентрации парниковых газов, где в качестве внешнего воздействия на климатическую систему рассматривается 180-летний цикл обращения Солнца вокруг центра масс Солнечной системы. На роль естественных факторов в современных изменениях климата указывается в [23, 24], согласно которым в зимний период в умеренных широтах мощные циркуляционные процессы, связанные с взаимодействием океана и атмосферы, вызывают

значительные колебания температуры с масштабами от межгодового до нескольких десятилетий, накладывающиеся на общий процесс глобального потепления и существенно изменяющие его проявление. Согласно [2], динамика современного климата определяется тремя наблюдаемыми компонентами циркуляции: относительно высокочастотными вынужденными возмущениями (периоды 2–8 лет), циклическими колебаниями (20–50 лет), вековым трендом. Роль естественных факторов в происходящих современных изменениях климата обсуждается также в [4, 9–12, 15].

Материалы и методика исследований

В качестве исходных материалов использовались временные ряды приповерхностной температуры воздуха и атмосферного давления в узлах регулярной широтно-долготной сетки за период 1900–2014 гг., подготовленных Отделом климатических исследований Университета Восточной Англии (ряд CRU) [18, 21, 22]. Авторы располагали данными по температуре воздуха в период 1900–2014 гг. и атмосферному давлению в период 1900–2000 гг.

Вначале в каждом узле вычислялись многолетние средние значения для января и июля по всему указанному периоду как для температуры T , так и для давления P . Затем строились карты распределения средних многолетних значений P и T как в целом по всему периоду, так и по более коротким: 1900–1929, 1930–1959, 1960–1987, 1988–2000, 1988–2014 гг. Затем были построены разностные карты путем вычитания данных более раннего периода из более позднего. Сходство полей определялось как визуально, так и по рассчитанному критерию аналогичности ρ . С использованием метода композитов оценивалось влияние ряда циркуляционных колебаний на термический режим Северного полушария.

Для выяснения возможности продления ряда давления в умеренной зоне СП были вычислены средние, дисперсии и коэффициенты линейной корреляции между рядами давления в умеренной зоне по данным CRU и NCEP-DOE реанализа за перекрывающийся период с 1979 по 2000 год.

Было установлено, что коэффициенты корреляции за указанный период для разных месяцев года изменяются в пределах

0,96–0,98, а выборочные средние и дисперсии не отличаются на уровне значимости 0,05. В результате методом линейной регрессии ряд давления CRU в умеренной зоне СП был продлен до 2014 г. по данным реанализа NCEP-DOE, что позволило рассмотреть долгопериодные колебания P и T в центрах действия атмосферы и на территории Приволжского федерального округа.

С целью определения общей тенденции изменения температуры и давления в умеренной зоне СП (32,5–67,5° с. ш.) в период 1900–2014 гг. исходные данные в узлах сетки осреднялись по всей широтной полосе для января, июля и года в целом. Полученные временные ряды подвергались статистической обработке. Кроме этого, они сглаживались с помощью фильтра Поттера для оценки долгопериодной изменчивости, т. е. отфильтровывались волны с периодом меньше 20 лет.

Анализ результатов

Анализ рис. 1 показывает, что многолетний ход среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) в 115-летний период (1900–2014 гг.) испытывал определенные колебания. Так, с 1900 по 1945 г. наблюдался прирост температуры на 0,52 °С, затем СГТВ плавно понижалась до 1970 г. примерно на 0,1 °С в связи с небольшим похолоданием климата, и начиная с начала 1970-х годов наблюдается активная фаза потепления. Прирост температуры составил около 0,9 °С. В то же время кривая атмосферного давления указывает на тенденцию его падения, за исключением небольшого периода 1935–1952 гг., когда оно возрастало. Таким образом, в периоды 1900–1935 и 1975–2014 гг. наблюдался противофазный ход атмосферного давления и температуры воздуха в умеренной широтной зоне, что свидетельствует об усилении циклонической активности в периоды потепления климата в начале XX столетия и в последние десятилетия на рубеже XX–XXI вв. В целом подобная закономерность отмечается также в январе и июле.

Были построены карты средних полей температуры воздуха и приземного давления для января и июля во внетропическом поясе от 20° с. ш. до Северного полюса по ранее рассчитанным средним значениям в узлах сетки за длительный период (по температуре с 1900 по 2014 г., по давлению с 1900 по 2000 год).

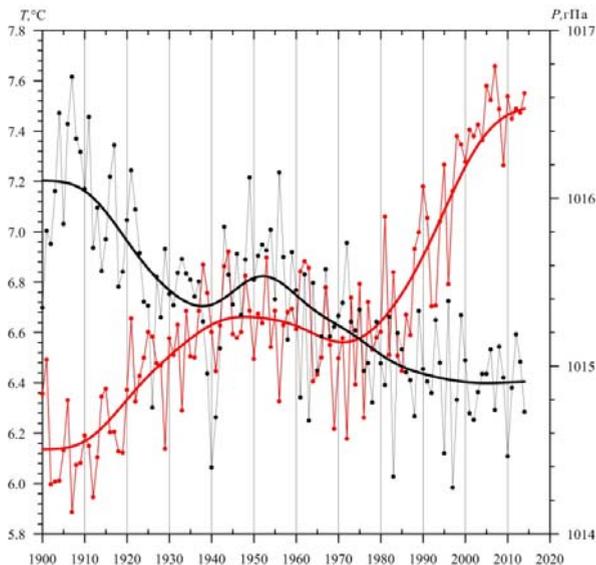


Рис. 1. Многолетний ход средних годовых значений (исходные данные и НЧК с периодом более 20 лет) давления, приведенного к уровню моря (черная линия), и приземной температуры воздуха (красная линия).

Структура полей, представленных на этих картах, в целом хорошо воспроизводит известные климатические закономерности пространственного распределения рассматриваемых метеорологических величин. В частности, в январе на климатической карте давления выделяются Исландский и Алеутский минимумы, Сибирский максимум, а в июле Гонолульский и Азорский максимум, а также обширная Азиатская депрессия.

Для анализа развития климатических процессов в 1900–2014 гг. анализировались разности приповерхностной температуры воздуха и атмосферного давления между выделенными периодами. Как видно из рис. 2 а, январь в период 1930–1959 гг. оказался значительно теплее по сравнению с январем 1900–1929 гг. в полярной области, на севере Евразии ΔT достигает 3 °С, на крайнем северо-востоке Сибири в районе Чукотки $\Delta T = 3\text{--}4$ °С.

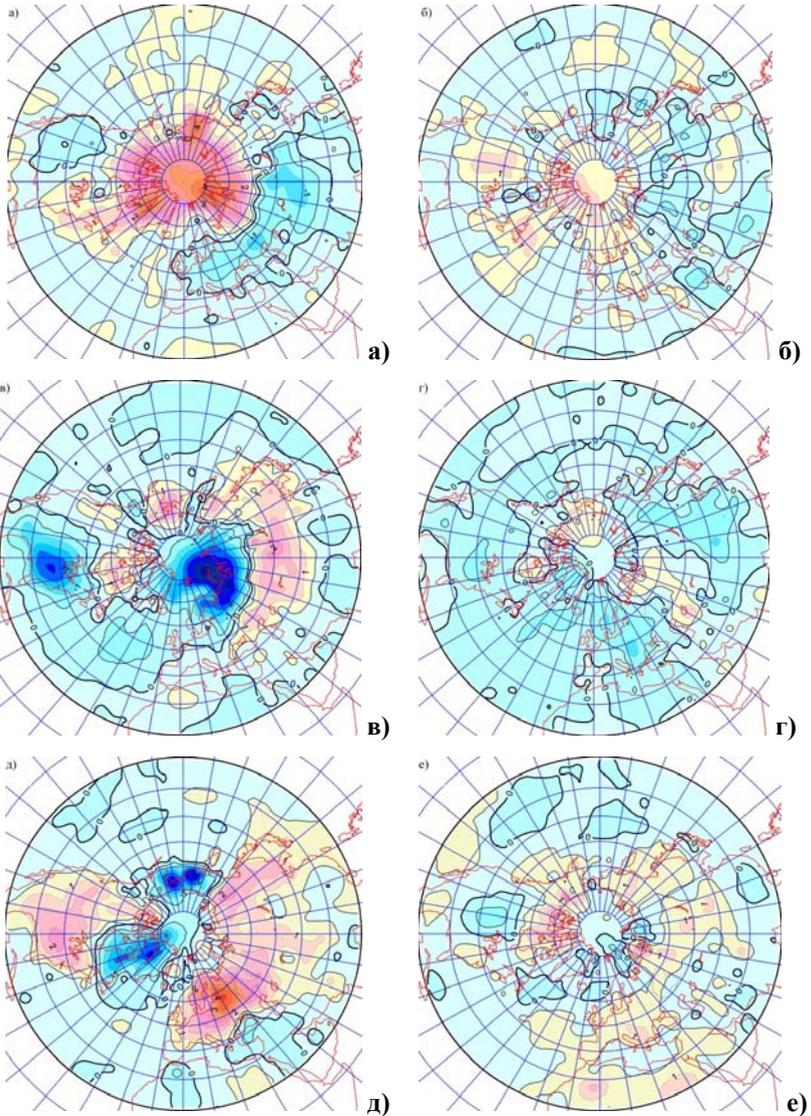


Рис. 2. Разности средних значений температуры периодов 1930–1959 и 1900–1929 гг. (а, б); 1960–1987 и 1930–1959 гг. (в, г); 1988–2000 и 1960–1987 гг. (д, е) в январе (слева) и июле (справа).

В Западном полушарии на территории Канадского архипелага и Гренландии также заметно потеплело (на 2–3 °С). Согласно [1], наиболее легкие ледовые условия в Северо-Европейском бассейне и сибирских арктических морях пришлось на 1930–1950-е годы, что соответствует полученным результатам. Однако в Европе и на большей части Азиатского континента температура понизилась примерно на 1 °С.

В период 1960–1987 гг. по сравнению с 1930–1959 гг. (рис. 2 в) ситуация коренным образом изменилась: в Арктике, на севере Европы и Азии температура понизилась на 3 °С, однако более южные районы Азии заняты положительной аномалией температуры ($\Delta T = 2$ °С). На юго-востоке США отмечается очаг холода до -2 °С, на большей части территории СП различия между сравниваемыми периодами невелики, преобладает похолодание. Следует отметить, что, согласно данным рис. 2 в, в приатлантической и притихоокеанской частях Арктики формируются аномалии температуры противоположного знака.

В период 1988–2000 гг. по сравнению с 1960–1987 гг. (рис. 2 д) наблюдается понижение температуры на северо-востоке Северной Америки и в районе Алеутской депрессии ($\Delta T = -2$ °С). Евразия и большая часть Североамериканского континента, в отличие от акваторий Атлантического и Тихого океанов, к концу столетия значительно прогрелись ($\Delta T \approx 4$ °С). В заключительный период 1988–2014 гг. по сравнению с 1960–1987 гг. наблюдается значительное потепление на континентах до 2–3 °С и охлаждение в акватории Северной Атлантики, и особенно в районе Алеутской депрессии, где ($\Delta T = -2$ °С).

В июле перестроечные процессы выражены заметно слабее относительно январских (рис. 2 б, г, е). Выделяются два периода: 1960–1987 гг., когда практически повсеместно (за исключением восточной Арктики) похолодало по сравнению с 1930–1959 гг. (рис. 2 г), и заключительный теплый период 1988–2014 гг. В эту наиболее активную фазу глобального потепления климата июльские температуры заметно повысились по сравнению с 1960–1987 гг. над Европейским континентом, Северной Африкой, северо-востоком Северной Америки, восточной Азией. В то же

время потепление не коснулось значительной части акватории Тихого и Атлантического океанов (рис. 2 е).

Разница между полями давления в январе в периоды 1930–1959 и 1900–1929 гг. (рис. 3 а) указывает на понижение P в центральной Арктике ($\Delta P = -5$ гПа), в области Алеутской депрессии ($\Delta P = -3$ гПа), и рост в полосе от запада Североамериканского континента до Чукотки с очагами на Гренландии ($\Delta P = 5$ гПа), в Сибири ($\Delta P = 3$ гПа), остальная территория СП занята слабым понижением в поле давления (на 1 гПа). Особенно резкие изменения произошли между 1988–2000 и 1960–1987 гг. (рис. 3 д).

Большая часть Североамериканского континента, весь Арктический район с примыкающей Северной Атлантикой и Азиатский континент заняты отрицательной аномалией давления. Очаги отмечаются в районе Исландской депрессии (-7 гПа) и Сибирского максимума (-7 гПа). В это же время наблюдается некоторое ослабление Алеутской депрессии (слабый рост давления), усиление Азорского максимума (+3 гПа) и рост P в Средиземноморье ($\Delta P = 3$ гПа). Для январских условий четко прослеживается закономерность: противофазный характер колебаний атмосферного давления в приатлантической и притихоокеанской частях Арктики. Отметим, что в [6] также выявлена связь между солнечной активностью и формированием взаимосвязанных аномалий приземного давления воздуха противоположного знака в приатлантической и притихоокеанской частях Арктики. Здесь же физический механизм отмеченного явления не рассматривается.

В июле (рис. 3 б) произошло наиболее существенное понижение P в центре Арктики на 5 гПа в период 1930–1959 гг. по сравнению с 1900–1929 гг. и в целом достаточно умеренное по СП. В заключительный период 1988–2000 гг. по сравнению с 1960–1987 гг. над Северной Атлантикой давление слабо падает (-1 гПа), над акваторией северной части Тихого океана происходит слабый рост P (+1 гПа). В районе Китая сформировался очаг с падением P на 3 гПа (рис. 3 е). Таким образом, перестройка барического поля происходит более радикально в зимний период, чем в летний, что сказывается на структуре и интенсивности поля скоростей ветра.

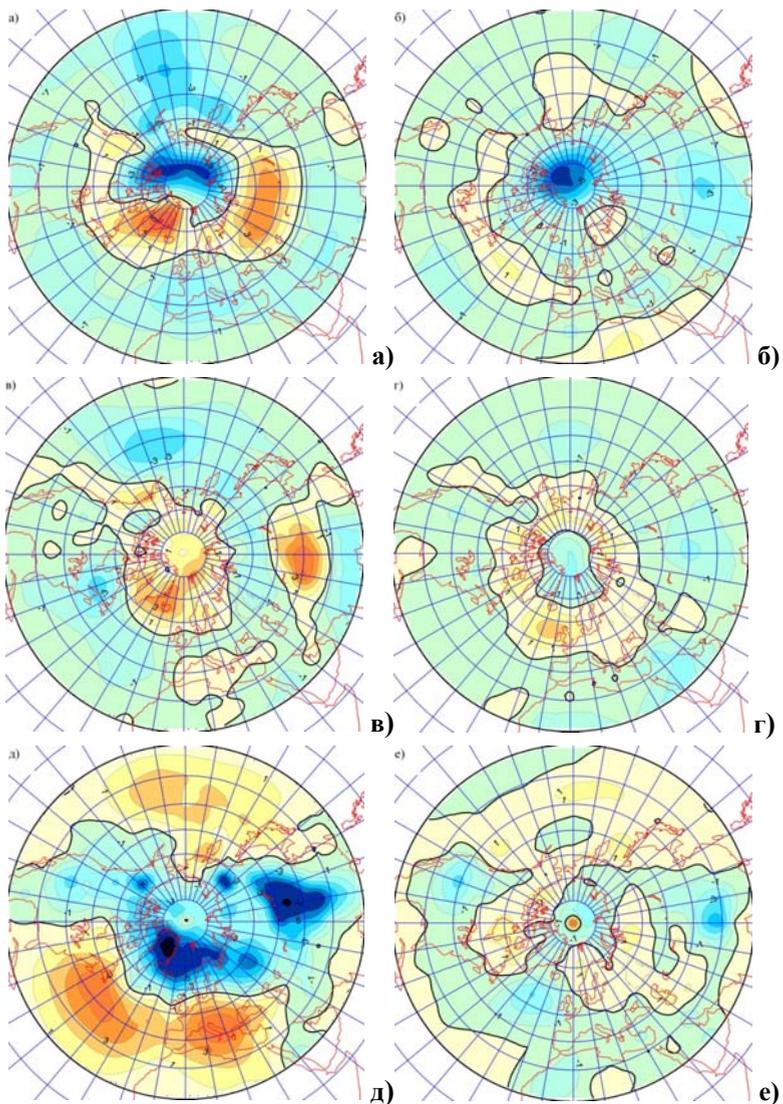


Рис. 3. Разности средних значений давления периодов 1930–1959 и 1900–1929 гг. (а, б); 1960–1987 и 1930–1959 гг. (в, г); 1988–2000 и 1960–1987 гг. (д, е) в январе (слева) и июле (справа).

Для оценки геометрического сходства полученных за разные периоды полей аномалий температуры воздуха и атмосферного давления использовался известный критерий аналогичности ρ [8]:

$$\rho = \frac{n_+ - n_-}{k}, \quad (1)$$

где k – общее количество узлов регулярной сетки; n_+ – количество узлов, где знаки аномалий двух полей совпадают; n_- – количество узлов, где знаки аномалий полей противоположные. Значения критерия изменяются в пределах $-1 \leq \rho \leq 1$.

Рассчитанные значения ρ за различные периоды XX–XXI столетий для полей аномалий температуры и давления для широтной зоны $27,5$ – $67,5^\circ$ с. ш. представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Значения показателя подобия полей аномалий температуры за различные периоды для широтной зоны (27,5–67,5° с. ш.)

Период	Январь				Июль			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
I	1	-0,19	0,16	0,22	1	-0,39	0,28	0,44
II	-0,19	1	0,15	0,17	-0,39	1	-0,18	-0,19
III	0,16	0,15	1	0,86	0,28	-0,18	1	0,79
IV	0,22	0,17	0,86	1	0,44	-0,19	0,79	1

Примечания: I – (1930–1959) – (1900–1929) гг.; II – (1960–1987) – (1930–1959) гг.; III – (1988–2000) – (1960–1987) гг.; IV – (1988–2014) – (1960–1987) гг.

Как видно из табл. 1, в поле температуры воздуха наиболее тесно связаны значения разностей полученных для двух соседних периодов III и IV $\rho = 0,86$ в январе и в июле $\rho = 0,79$. В январе в целом сходство в рассматриваемых полях не столь велико (ρ меняется в пределах от -0,19 до 0,22). В июле значения ρ заметно возрастают, колеблются в пределах от -0,39 до 0,44, что свидетельствует о более стабильном характере процессов.

Таблица 2

**Значения показателя подобия полей аномалий давления
за различные периоды для широтной зоны (27,5–67,5° с. ш.)**

Период	Январь			Июль		
	I	II	III	I	II	III
I	1	0,26	-0,33	1	-0,02	-0,09
II	0,26	1	-0,35	-0,26	1	0,17
III	-0,33	-0,35	1	-0,09	0,17	1

Примечания: I – (1930–1959) – (1900–1929) гг.; II – (1960–1987) – (1930–1959) гг.; III – (1988–2000) – (1960–1987) гг.

Для атмосферного давления показатели ρ меняются в диапазоне от -0,35 до 0,26 в январе и от -0,02 до 0,17 в июле, т. е. совпадение значений разностей P в различные периоды в узлах не столь велико, что свидетельствует о значительной индивидуальности рассматриваемых периодов.

Как известно, значительную роль в формировании погодных и климатических аномалий в СП играют компоненты атмосферной циркуляции под названием центры действия атмосферы (ЦДА). Рассмотрим многолетнее поведение сглаженных с помощью фильтра Поттера временных рядов температуры воздуха и атмосферного давления (низкочастотных компонент с периодом более 20 лет) в центрах действия атмосферы СП в период 1900–2014 гг.

Рассмотрим вначале циркуляционную пару: Исландский минимум и Азорский максимум. В области Исландского минимума в январе НЧК температуры и давления в период 1900–2014 гг. испытывают небольшие колебания (рис. 4 а). Начиная с 1980-х годов температура повысилась до -6,5 °С примерно на 1,2 °С, а давление после достижения своего максимума в 1965 г. (~1004 гПа) стало понижаться, достигнув к концу рассматриваемого периода 999 гПа. Безусловно, кривая давления отражает более сложную динамику, чем кривая температуры. В июле температура воздуха (рис. 4 б) начиная с 1990 г. по настоящее время находится в активной фазе роста, она повысилась с 5,5 до 7,3 °С, и если раньше

давление и температура колебались в противофазе (1910–1960 гг.), то в заключительный период давление также испытывает слабый рост и достигло 1011 гПа. Отметим, что в 1925 г. давление в Исландском ЦДА достигло своего минимума (1008 гПа).

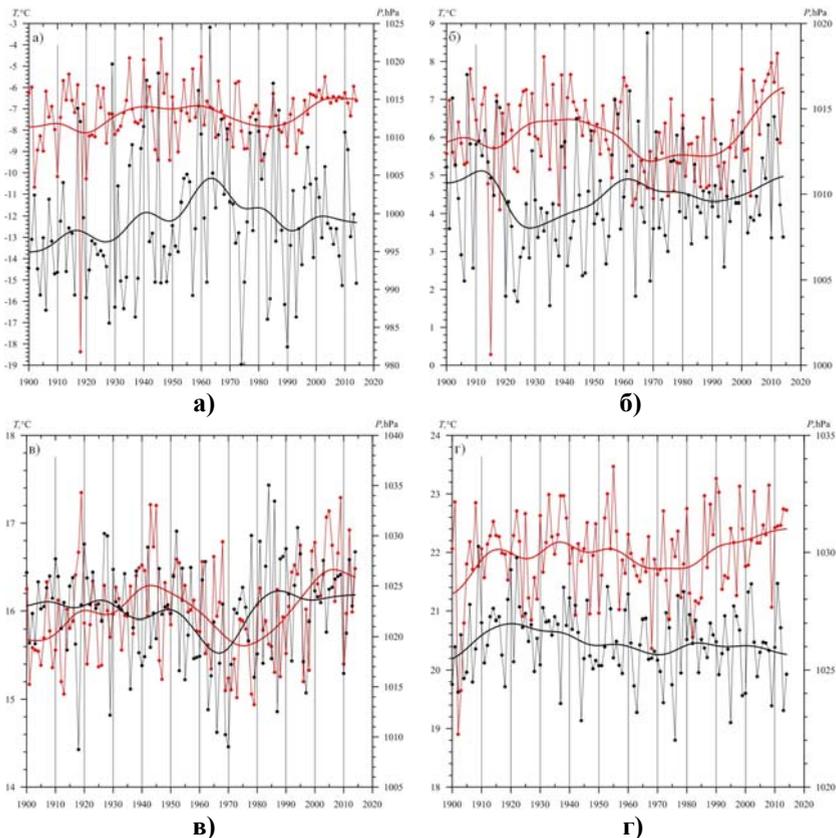


Рис. 4. Многолетний ход давления (черная линия) и температуры воздуха (красная линия) в области Исландского минимума (а, б) и Азорского максимума (в, г) в январе (а, в) и июле (б, г).

В районе Азорского максимума в январе (рис. 4 в) картина более сложная, чем для Исландского минимума: происходят

волнообразные колебания НЧК P и T , при этом с 1965 г. давление повысилось с 1018 до 1024 гПа (1990 г.), а затем пошло на понижение. Температура с 1975 г. повысилась от 15,6 до 16,4 °С в 2005 г. и далее стала понижаться. В июле (рис. 4 г) наблюдаются плавные слабые изменения термодинамических параметров, при этом с 1980 г. температура слегка растет и достигла к 2014 г. 22,4 °С, а давление, наоборот, испытывает слабое падение и к концу рассматриваемого периода опустилось до 1025,6 гПа.

Анализ НЧК температуры воздуха и атмосферного давления в Северо-Тихоокеанской паре – Алеутском минимуме и Гонолульском максимуме – показал, что в январе (рис. 5 а) в Алеутском минимуме наиболее интересным является факт падения атмосферного давления в период с 1910 по 1930 г. на 7,5 гПа (с 1005,0 до 997,5 гПа) и рост температуры на 1,2 °С с 1910 по 2014 г. В июле (рис. 5 б) наблюдается заметное повышение температуры на величину около 1 °С с 1950 г. по настоящее время. Кривая НЧК давления испытывает колебания с небольшой амплитудой. Сравнение временного хода НЧК давления в Исландской и Алеутской депрессиях указывает на противофазный характер их колебаний.

В области Гонолульского максимума как в январе, так и в июле (рис. 5 в, г) термобарические процессы протекают достаточно стабильно. Не наблюдается значительных временных изменений. Можно отметить лишь небольшое понижение температуры и рост давления в последние десятилетия в январе, а в июле слабое понижение и давления, и температуры воздуха в последние годы.

Следует отметить, что рассмотренный многолетний ход термодинамических параметров в ЦДА находит свое отражение в динамике североатлантического колебания (NAO) и западно-тихоокеанского колебания (WP), в значительной степени влияющих на погодные условия Северной Евразии и Северной Америки соответственно.

Что касается Сибирского максимума, то наблюдается резкое январское понижение давления с конца 1960-х гг. до 1994 г. с 1039 до 1030 гПа. После этого давление стало расти и достигло 1036 гПа в конце периода. Температура изменялась в противофазе с давлением и испытывала начиная с 1930-х гг. до 1990 г. весьма заметный рост (с -25,6 до -22,2 °С). В заключительной фазе с 1990 г. наблюдается слабое понижение НЧК температуры.

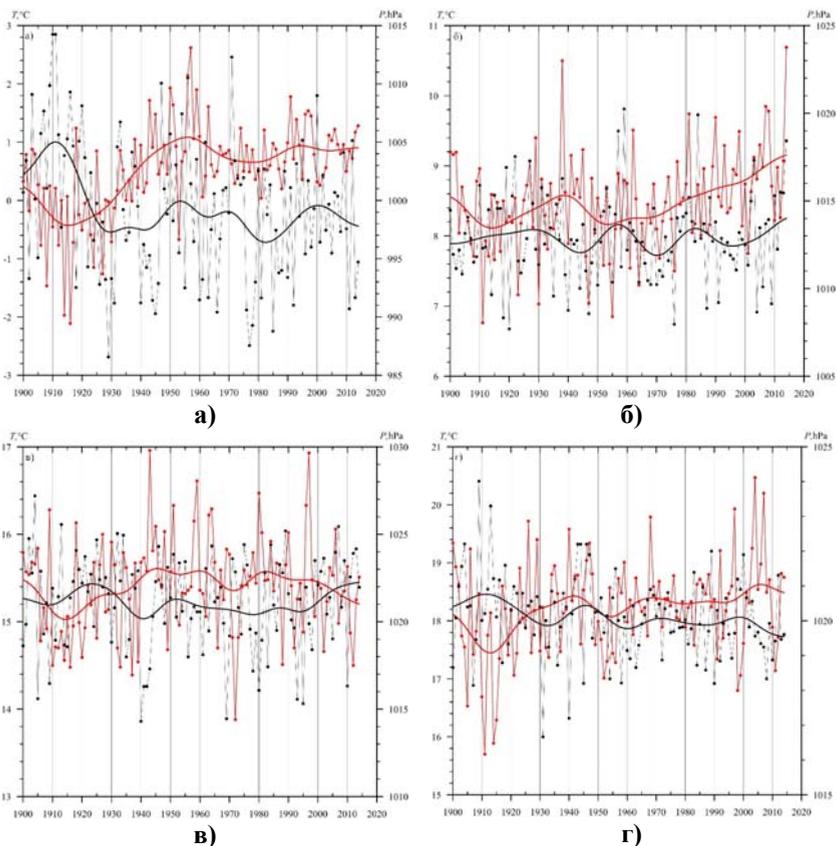


Рис. 5. Многолетний ход давления (черная линия) и температуры воздуха (красная линия) в области Алеутского минимума (а, б) и Гонульского максимума (в, г) в январе (а, в) и июле (б, г).

Европейская часть России, включая ПФО, в зимнее время часто подвергается воздействиям со стороны Северной Атлантики. Согласно [14], обнаруживается достаточно тесная корреляция между циркуляционными модами североатлантического колебания и арктической осцилляции, с одной стороны, и температурой воздуха и атмосферным давлением ПФО, с другой. Многолетний ход НЧК давления и температуры представлен на рис. 6.

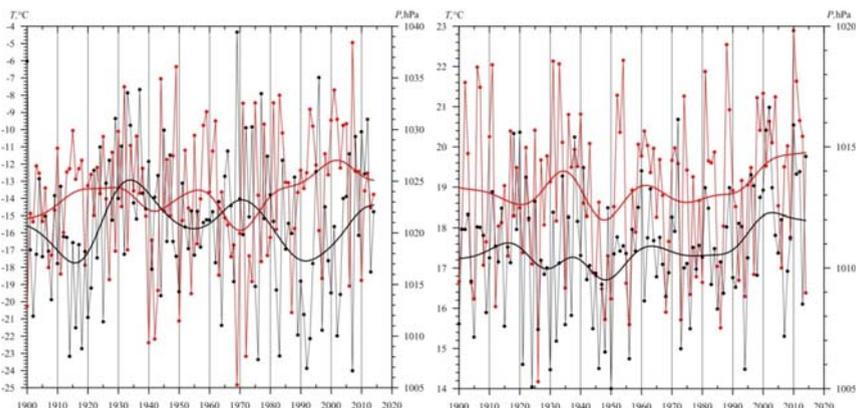


Рис. 6. Многолетний ход давления (черная линия) и температуры воздуха в области ПФО в январе (слева) и июле (справа).

Как видно из рисунка, в январе P и T меняются в противофазе. При этом визуально можно выделить три периода в ходе кривых 1900–1930, 1930–1980 и 1980–2014 гг. Средний период отличается своей неустойчивостью, в последнем периоде температура интенсивно повышалась с 1970 по 2005 г. с $-15,8$ до $-11,4$ °C (в последние годы происходит ее снижение), давление начиная с 1990 г. растет с 1017 до 1023 гПа. Таким образом, зимний процесс отличается своей активностью на территории ПФО.

В июле колебания P и T происходят достаточно плавно. В последние десятилетия температура повышается, а давление с 2004 г. слабо падает.

В заключительной части статьи рассмотрим влияние ряда пространственно-временных мод, характеризующих межгодовую изменчивость поля давления во внетропических широтах Северного полушария, на приповерхностную температуру воздуха. В качестве меры изменчивости таких мод обычно используются циркуляционные индексы, которые рассчитывают на основании разложения полей давления или геопотенциала на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ).

В качестве исходного материала использовались следующие индексы: североатлантическое колебание (САК), арктическая ос-

цилляция (АО), скандинавское колебание (СК), восточно-атлантическое колебание (БАК), восточно-атлантическое-западно-российское колебание (ВАЗРК) в период 1950–2014 гг. для января и июля. Поле приповерхностной температуры воздуха в широтной зоне 20–90° с. ш. было представлено данными в узлах регулярной сетки (данные CRU) для января и июля в 1950–2014 гг.

Характеристика циркуляционных индексов дана в ряде работ, например в [13, 16]. Важно отметить, что вышеперечисленные индексы циркуляции характеризуют временные изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы и имеют географическую привязку [17].

В качестве основного метода статистической обработки исходных данных был выбран композитный анализ [16]. Следуя этой работе, для выделения чистого сигнала, соответствующего влиянию отдельной циркуляционной моды на термический режим рассматриваемой территории, были выполнены следующие операции. Вначале для конкретного месяца составлялся временной ряд одного из индексов циркуляции с вычислением его среднего значения и среднего квадратического отклонения σ (СКО). Затем формировались выборки аномальных лет, в которых значение индекса циркуляции либо превышает среднее значение на величину σ и более или, наоборот, меньше на σ

Для полученных выборок лет (с положительными и отрицательными фазами колебаний циркуляции атмосферы) подбирались среднемесячные значения температуры воздуха в каждом узле исходной сетки. Для вновь сформированных выборок метеовеличин находились средние значения, дисперсии и СКО. На заключительном этапе получен чистый сигнал посредством определения разности между средними по выборкам для каждого узла сетки, т. е. разностный композит. Статистическая значимость полученных сигналов была определена по стандартному алгоритму с использованием критерия Стьюдента.

Рассмотрим результаты расчетов по каждому из пяти колебаний.

1. Влияние САК. Как известно, индекс САК отображает многолетние колебания интенсивности зонального переноса над

внетропической зоной Северной Атлантики. Влияние САК на температурное поле наиболее велико в зимний период. В январе значительная часть Евразии находится под влиянием САК. Значение разностного композита в $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ с высокой степенью достоверности выделяемого сигнала (95%-ный доверительный уровень) наблюдается на обширной территории Западной и Восточной Европы, Сибири, Центральной Азии и Дальнего Востока. Максимального значения величина разностного композита в $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (результат значим на 99%-ном уровне) достигает на территории Центральной и Восточной Европы и в Средней Сибири. В то же время в Западном полушарии выделяется очаг с отрицательным значением композита в $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что объясняется затоком холодного воздуха с Арктики вдоль западного побережья Гренландии.

2. Влияние АО. Сравнение полученных карт композитов для САК и АО отмечает их значительное сходство. Максимальная активность АО проявляется в Восточном полушарии, где на территории Восточной Европы и Сибири разностные композиты достигают $+7$ и $+9\text{ }^{\circ}\text{C}$ с высокой статистической значимостью выделяемого сигнала (99%-ный доверительный уровень). Ареал со значением разностного композита приповерхностной температуры воздуха $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ занимает обширную территорию Евразии. В то же время в Западном полушарии в районе Восточного побережья Северной Америки значение разностного композита $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В июле поле композитов слабее. Лишь в Восточной Европе и на территории Северной Америки выделяются зоны со значением разностного композита в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 7).

3. Влияние СК. Воздействие СК проявляется противоположным образом относительно АО и САК. Так, в январе область отрицательных значений СК захватывает Восточную Европу, Западную и Среднюю Сибирь. Значение разностного композита $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. В центре этой области происходит усиление влияния СК до $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. В то же время на большей части Арктического бассейна отмечаются положительные значения композита $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$. В летний период влияние СК значительно ослаблено. Выделяются отдельные ареалы со значением композита в -1 и $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 7).

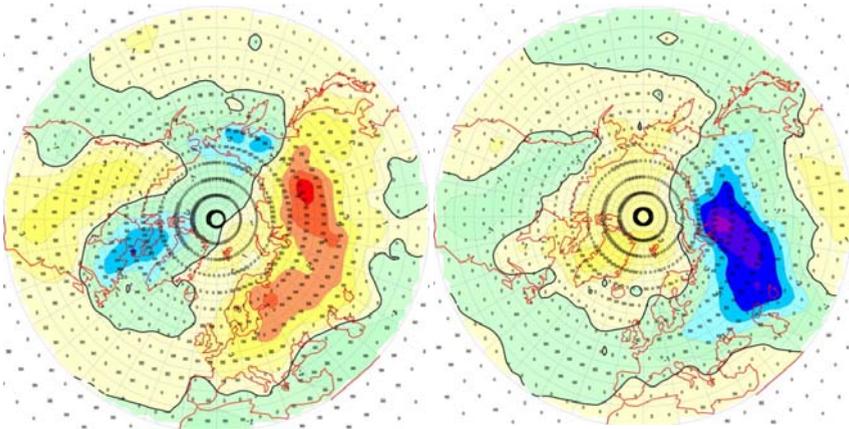


Рис. 7. Поле разностного композита приповерхностной температуры для индекса АО (слева) и SCAND (справа) в январе (1950–2014 гг.).

4. Влияние ВАК. Индекс ВАК определяет интенсивность зональной циркуляции в Атлантико-Европейском регионе в зимний период. В январе в поле разностных композитов для приземной температуры выделяется обширная территория Евразии, где значение композитов меняется от $+1$ до $+3$ °С. Аналогичная область сформировалась в Северной Америке. Отрицательные значения композитов отмечаются в южной и восточной части Арктического бассейна и в районе Колымы и Чукотки (-1 °С). В июле поле разностного композита температуры достаточно однородное. Значения композита достигают на значительной части территории $+1$ °С. По сравнению с полем САК и АО роль индекса ЕА невелика, что отражается в структуре поля композитов.

5. Влияние ВАЗРК. Влияние этого фактора также заметно уступает САК и АО. В январе лишь в Средней Сибири и в центре Америки значения композита $+3$ °С, в северо-восточной части Европы сформировался очаг с разностью в -5 °С. В июле значения композитов невелики, достигают $+1$ и -1 °С в отдельных регионах.

Таким образом, лишь три осцилляции – САК, АО и СК – оказывают крупномасштабное и интенсивное влияние на температурный режим Северного полушария (20 – 90 ° с. ш.) в зимний период,

что свидетельствует о ведущей роли циркуляционного механизма в формировании крупных аномалий температуры воздуха.

Выводы

1. Изменения сглаженных временных рядов приповерхностной температуры воздуха и атмосферного давления, осредненных по широтной зоне 32,5–67,5° с. ш., в период 1900–2014 гг. происходят в противофазе.

2. Анализ разностных карт приповерхностной температуры воздуха и атмосферного давления в широтной зоне 20–90° с. ш. выявил противофазный характер их поведения: так, в начале века (1900–1929 гг.) в поле давления преобладала тенденция к росту, а в поле температуры воздуха к ее понижению. Похолодание происходило на фоне высокого давления. В период 1988–2000 гг., напротив, потепление климата происходило на пониженном фоне атмосферного давления.

3. Выполнен низкочастотный анализ с помощью фильтра Поттера среднеянварской и среднеиюльской приповерхностной температуры и атмосферного давления для ряда территорий – Исландского и Алеутского минимумов, Азорского, Гонолульского и Сибирского максимумов, территории Приволжского федерального округа.

4. Низкочастотные колебания атмосферного давления в Исландской и Алеутской депрессиях имеют противофазный характер.

5. Анализ низкочастотной компоненты температуры воздуха на территории Приволжского федерального округа выявил ее рост в период с 1970 по 2005 г. с -15,8 до -11,4 °С в январе, в июле происходит устойчивое повышение температуры воздуха с 1970-х гг. по 2014 г. Отмечается рост атмосферного давления в январе с 1017 до 1023 гПа. начиная с 1990 г., а в июле слабое падение в последние десятилетия.

6. Наибольшее влияние на температурный режим внетропических широт Северного полушария в последние десятилетия, согласно композитного анализа, оказывали североатлантическое колебание, Арктическая осцилляция и Скандинавское колебание. И если на территории Северной Евразии формировались очаги

тепла, то на востоке Северной Америки и в Гренландии очаги отрицательных аномалий температуры.

Работа выполнена на средства субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, а также при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-05-06349).

Список использованных источников

1. *Алексеев Г.В., Захаров В.Ф., Смирнов А.Н., Смирнов Н.П.* Многолетние колебания ледовых условий и атмосферной циркуляции в приатлантической Арктике и Северной Атлантике // *Метеорология и гидрология*. – 1998. – № 9. – С. 87–98.

2. *Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г., Романов Ю.А.* Особенности динамики климата в XX столетии // *ДАН*. – 2002. – Т. 384, № 5. – С. 674–681.

3. *Вакуленко Н.В., Нигматуллин Р.И., Сонечкин Д.М.* К вопросу о глобальном изменении климата // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 9. – С. 89–97.

4. *Верещагин М.А., Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Тудрий В.Д.* Факторный анализ многолетней динамики глобального термического режима приземного слоя атмосферы // *Известия РАН. Серия географическая*. – 2004. – № 5. – С. 34–41.

5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1008 с.

6. *Егоров А.Г.* Солнечная активность, барическая волна в приземной атмосфере Арктики и многолетние изменения арктического колебания // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 2. – С. 27–37.

7. *Крыжов В.Н., Горелиц О.В.* Арктическая осцилляция и ее влияние на температуру и осадки в Северной Евразии в XX в. // *Метеорология и гидрология*. – 2005. – № 6. – С. 5–13.

8. *Мартазинова В.Ф., Тимофеев В.Е.* Современное состояние атмосферной циркуляции в Северном и Южном полушарии и региональные климатические особенности в Атлантико-Европейском секторе и районе Антарктического полуострова // *Проблемы Арктики и Антарктиды*. – 2008. – № 3 (80). – С. 17–37.

9. *Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Наумов Э.П., Верещагин М.А.* Особенности проявления современного потепления климата в тропосфере Атлантико-Европейского региона // *Метеорология и гидрология.* – 2004. – № 2. – С. 38–47.

10. *Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Наумов Э.П., Верещагин М.А., Николаев А.А.* Региональные проявления современного потепления в тропо-стратосфере Северного полушария // *Известия РАН. Серия географическая.* – 2005. – № 6. – С. 6–16.

11. *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.

12. *Переведенцев Ю.П., Шарипова Р.Б.* Изменение основных климатических показателей на территории Ульяновской области // *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле.* – 2012. – № 6. – С. 136–144.

13. *Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В.* Теория общей циркуляции атмосферы. – Казань: Казанский университет, 2013. – 223 с.

14. *Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Аухадеев Т.Р., Исмагилов Н.В., Занди Р.* О влиянии макроциркуляционных систем на термобарический режим Приволжского федерального округа // *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки.* – 2014. – Т. 156, № 2. – С. 156–169.

15. *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.

16. *Полонский А.Б., Кибальчич И.А.* Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // *Метеорология и гидрология.* – 2015. – № 1. – С. 5–17.

17. *Попова В.В., Шмакин А.Б.* Циркуляционные механизмы крупномасштабных аномалий температуры воздуха зимой в Северной Евразии в конце XX столетия // *Метеорология и гидрология.* – 2006. – № 12. – С. 15–25.

18. *Brohan P. et al.* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850 // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – P. 1–35.

19. *Charvatova I.* Solar-terrestrial and climatic phenomena in relation to solar inertial motion // *Surv. Geophys.* – 1997. – Vol. 18. – P. 131–136.

20. 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 et al. (eds). – Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.

21. Jones P.D. et al. Surface air temperature and its variations over the last 150 years // Rev. Geophys. – 1999. – Vol. 37. – P. 173–199.

22. Rayner N.A., Brohan P., Parker D. et al. Improved changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the midnineteenth century: the HadSST2 dataset // J. Climate. – 2006. – Vol. 19. – P. 446–469.

23. Wallace J.M., Zhang Y., Bajuk L. Interpretation of interdecadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature // J. Climate. – 1966. – Vol. 9. – P. 249–259.

24. Wallace J.M., Thompson D.W. Annual models and climate prediction // Physics Today. – 2002. – Vol. 55, No. 2. – P. 28–33.

Поступила в редакцию 4.05.2016 г.

ОЦЕНКА АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСЛОВИЙ ЗИМОВКИ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ОБЛАСТЯХ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Л.Л. Тарасова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
lydia_tarasova@mail.ru*

Возделывание зерновых культур является важнейшей частью сельскохозяйственного производства. Особое место занимают озимые зерновые культуры, которые всегда были главным русским хлебом, их роль в продовольственном обеспечении России трудно переоценить. Озимые зерновые культуры возделываются практически во всех зерносеющих районах России, им отданы большие площади плодородных черноземных земель Северного Кавказа, юга Центрального и Приволжского федеральных округов.

Сейчас, по данным Росстата, доля озимых в общих валовых сборах зерновых культур в России составляет около 40–60 %. Причем можно предполагать, что в будущем значение озимых будет только возрастать. Это связано как с экономическими причинами – осенний сев существенно снижает трудовые затраты и нагрузку на технику, так и с агроклиматическими – быстрое развитие посевов весной дает им возможность более полно пользоваться ресурсами почвенной влаги.

Ценность озимых зерновых культур не только в их высокой урожайности. По данным В.А. Федорова, новые хозяйственно ценные сорта твердой озимой пшеницы не уступают по зимостойкости

традиционным, а по качеству зерна, содержанию белка и стекловидности близки к лучшим яровым сортам [18]. Именно поэтому доля озимых, как дающих более стабильные урожаи, будет расти и впредь.

Однако все преимущества озимых культур наиболее полно реализуются в годы с хорошей перезимовкой. Понятно, что в неблагоприятные по условиям перезимовки годы валовые сборы зерна озимых резко снижаются [12].

Сохранность посевов, с одной стороны, зависит от агротехнических факторов, т. е. от сроков сева и качества выполнения посевных работ, севооборота, защиты растений от болезней и вредителей и т. п. С другой стороны, погодные условия могут быть как благоприятными (и в этом случае даже некоторые огрехи земледельца не скажутся на качестве и количестве урожая), так и суровыми, вплоть до гибели посевов из-за вымерзания, выпревания, ледяной корки, вымокания, а также в результате комплекса неблагоприятных факторов. Именно поэтому изучению агрометеорологических условий формирования урожайности озимых зерновых культур, и в первую очередь озимой пшеницы, посвящены десятки работ.

Вопрос зимовки растений особенно актуален в свете современных изменений климата. В ряде работ [2, 3, 13] показано, что в целом годовые максимумы температуры летом на территории России менее характеризуют глобальное потепление, чем годовые минимумы (зимние экстремумы), т. е. статистически значимые изменения температуры воздуха приурочены именно к холодному периоду, а изменение климата в первую очередь сказывается в потеплении зим.

Именно поэтому изучение агрометеорологических условий зимовки и отклика сельскохозяйственных культур на наблюдаемые изменения климата является актуальной и практически важной задачей.

База данных

Нами проведен агроклиматический анализ условий зимовки посевов в центральных черноземных областях (ЦЧО) за период

с 1965 по 2012 г. В качестве границы «до значительных изменений климата» и «в период» нами было условно принят 1990 год. Таким образом весь период мы разделили на два подпериода (зимы 1965/1966–1990/1991 и 1991/1992–2012/2013 гг.), для которых и искали связи урожайности озимых зерновых культур с условиями зимовки.

Вопрос о более точном делении на подпериоды «до изменения климата» и «в период изменения климата» в свете рассматриваемой проблемы не представляется принципиальным. На рис. 1, 2, 4, 5, где представлена динамика за весь исследуемый период, видно, что наиболее яркие события, формирующие диполь «до» и «в период» климатических изменений, приурочены к 60–70-м годам прошлого века и началу XXI века. Следует оговорить, что в качестве экспериментов рассматривались и другие варианты деления на подпериоды, но принципиального различия в полученных результатах не было.

В нашем распоряжении были архивы отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра России, содержащие информацию о площадях гибели посевов зимой (доли площадей с плохим состоянием посевов весной), среднеобластных значениях температуры почвы на глубине узла кущения и высоте снежного покрова на полях с озимыми культурами декадного и месячного разрешения. Использовались также данные ВНИИГМИ-МЦД по температуре воздуха, количеству осадков и высоте снежного покрова по рейке на станции суточного разрешения по станциям Рыльск (Курская область), Богородицкое-Фенино (Белгородская область), Каменная Степь (Воронежская область) и Тамбов (Тамбовская область).

Основные факторы, определяющие условия зимовки озимых зерновых культур

Гибель озимых культур в период зимовки, как правило, происходит в результате вредного влияния на растения комплекса неблагоприятных условий. Лишь в отдельные годы она бывает вызвана сильными морозами, но именно из-за морозов озимые погибают на больших площадях.

Термический режим почвы

Температура почвы на глубине узла кушения формируется под влиянием совместного действия температуры воздуха и снежного покрова. Даже кратковременное понижение ее ниже критической приводит к повреждению или даже гибели растений [5].

Величина температуры на глубине узла кушения может служить также показателем степени воздействия среды на зимостойкость посевов, с помощью которого можно оценить агроклиматические ресурсы района, где высевают озимые культуры.

Общеизвестно, что в ЦЧО основным зимним повреждающим фактором является очень низкая температура почвы на глубине узла кушения, приводящая к вымерзанию посевов. В зависимости от сортовых особенностей, степени развития растений, агрометеорологических условий в период осенней закаливания критическая температура вымерзания будет варьировать. По данным И.И. Туманова [17], при благоприятных условиях морозоустойчивость озимой пшеницы к концу второй фазы закаливания может составлять $-18...-22^{\circ}$, озимой ржи – $-20...-25^{\circ}$. В течение зимы морозоустойчивость растений также не константна. В первой половине зимы устойчивость несколько повышается, достигая своего максимума в январе. При неустойчивой погоде с частыми оттепелями и установлением снежного покрова на слабопромерзшую почву растения существенно снижают зимостойкость.

Негативные последствия действия погоды на посевы оценивают по административным единицам, поэтому и анализ термического режима почвы традиционно ведется по областям. Зависимость изреженности посевов от средней по области минимальной за зиму температуры почвы имеет нелинейный характер. По данным В.М. Личикаки и В.А. Моисейчик [6, 10], при средней по области температуре почвы в диапазоне $-7...-5^{\circ}$ изреженность близка к нулю, а при понижении до -15° она резко возрастает. Здесь нужно заметить, что выбирается именно минимальная за зиму температура и длительность действия морозов не учитывается.

На рис. 1 представлены средние по областям значения минимальной за зиму температуры почвы на глубине узла кушения (3 см).

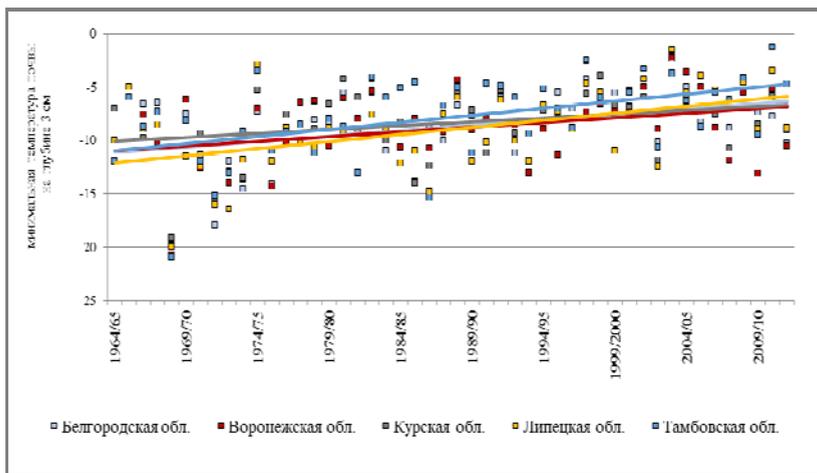


Рис. 1. Средний из абсолютных минимумов температуры почвы на глубине узла кущения.

Если за период 1965–1990 гг. в ЦЧО отмечались годы с температурой почвы близкой к -15° и ниже (в наиболее холодные зимы 1968/1969 и 1971/1972 гг. температура почвы понижалась до $-21\dots-18^{\circ}$), то после 1990 г. таких лет не было. Лишь в отдельных областях в наиболее суровые зимы этого периода (1993/1994, 2003/2004 и 2009/2010 гг.) она была $-13\dots-12^{\circ}$.

На рис. 1 четко прослеживается повышение фона температуры почвы в ЦЧО. В среднем по всем областям температура почвы в период 1965–1990 гг. составляла $-9,5^{\circ}$, а за период 1991–2012 гг. – $-7,1^{\circ}$. Важно, что наклон тренда во всех областях совпадает и составляет $0,7\text{--}1,3^{\circ}/10$ лет, и такая тенденция сохраняется, даже если мы исключаем из выборки наиболее суровые зимы 1968/1969 и 1971/1972 гг. Интересно отметить, что за этот же период, по данным

Северо-Евразийского климатического центра (<http://seakc.meteoinfo.ru>), тренд зимней температуры воздуха составил $0,4\text{--}0,6^{\circ}/10$ лет, т. е. почти в два раза ниже. Столь значительный тренд температуры почвы объясняется, по-видимому, тепляющим действием снежного покрова, средняя высота которого также растёт.

Согласно классификации А.М. Шульгина [19], центральные черноземные области принадлежат к району с мягким климатом почвы зимой (средний абсолютный минимум температуры почвы на глубине узла кущения -8...-12°), и условия зимовки здесь оценивались как хорошие, так как в 9 из 10 лет наблюдались оптимальные условия и лишь в одном году отмечалось вымерзание посевов (табл. 1). Полученные нами оценки термического режима почвы за период с зимы 1964/1965 по зиму 1989/1990 года полностью соответствуют приведенным в работе Шульгина данным.

Таблица 1

Температурный режим почвы на глубине залегания узла кущения

Области	Период*	Абсолютный минимум температуры почвы на глубине узла кущения, °С			Количество зим с температурой, %				Климат почвы зимой	Оценка условий перезимовки
		средний	максимальн	минималн.	выше -5°	-15...-5°	ниже -15°	в том числе ниже -20°		
Белгородская	I	-10,0	-5,5	-19,8	0	92	8	0	мягкий	хорошие
	II	-7,3	-2,4	-12,0	9	91	0		оч. мяг.	отличные
Воронежская	I	-9,8	-4,4	-20,7	4	88	8	4	мягкий	хорошие
	II	-7,9	-2,3	-13,1	9	91	0		оч. мяг.	отличные
Курская	I	-9,2	-4,3	-19,2	8	85	8	0	мягкий	хорошие
	II	-7,4	-3,7	-11,9	14	86	0		оч. мяг.	отличные
Липецкая	I	-10,6	-3,0	-20,0	4	85	12	0	мягкий	хорошие
	II	-7,1	-1,5	-12,5	27	73	0		оч. мяг.	отличные
Тамбовская	I	-9,4	-3,5	-21,0	12	77	12	4	мягкий	хорошие
	II	-6,0	-1,3	-10,7	36	64	0		оч. мяг.	отличные

Примечание: * I – зимы с 1964/1965 по 1989/1990 г; II – зимы с 1990/1991 по 2011/2012 г.

Во втором рассмотренном нами периоде (зимы с 1990/1991 по 2011/2012 г.) наблюдается не просто некоторое повышение фона температуры, а смена термического режима. Как мы уже отмечали,

холодных зим в этот период не было. Возросло число очень теплых зим, когда температура почвы на глубине залегания узла кушения была выше -5° . Теперь ЦЧО можно отнести к району с очень мягким климатом почвы зимой и отличными условиями перезимовки озимых. Такое изменение температурного режима должно сказаться на сохранности озимых культур, так как вымерзание посевов зимой становится маловероятным.

Таким образом, на основе полученных закономерностей можно утверждать, что изменения климата почвы в ЦЧО значимы и положительны с точки зрения оценки условий зимовки сельскохозяйственных культур. Однако можно предположить, что в теплые снежные зимы будет возрастать вероятность выпревания, особенно если при густых сильно раскустившихся посевах под снежным покровом образуется воздушная прослойка.

Снежный покров

В большом числе работ показано увеличение высоты снежного покрова в период изменения климата по сравнению с предшествующим периодом [1, 7, 15]. Однако с точки зрения зимовки растений важна не столько высота, сколько продолжительность залегания высокого снежного покрова, определяющая условия газообмена зимующих посевов [9].

В силу того, что снегосъемка на полях с зимующими культурами проводится один раз в декаду, что не позволяет точно определить период залегания снежного покрова, для анализа нами выбиралась высота снега на станции. Для анализа продолжительности залегания снежного покрова нами использованы данные по станциям Богородицкое-Фенино (Белгородская область), Рыльск (Курская область), Каменная Степь (Воронежская область) и Тамбов (Тамбовская область). Эти станции были выбраны, с одной стороны, как устойчиво работающие (длиннорядные), с другой стороны, на портале ВНИИГМИ-МЦД по ним доступен полный набор метеорологической информации. В силу того, что снежный покров образуется под действием процессов регионального масштаба, примем, что в других пунктах режим снежного покрова аналогичен.

Для каждой выбранной станции оценивалось число дней со снежным покровом более 2 см (табл. 2). Можно видеть, что длительные многоснежные и короткие малоснежные зимы наблюдались и в период до 1990 г., и после него. Однако в среднем продолжительность залегания снежного покрова практически не изменилась. Невязку до 3 дней будем считать незначимой.

Таблица 2

Продолжительность залегания снежного покрова

Станции	Период	Число дней со снежным покровом более 2 см		
		среднее	максимальное	минимальное
Богородицкое-Фенино	I	93	129	18
	II	104	152	46
Рыльск	I	85	127	38
	II	87	127	41
Каменная Степь	I	96	133	36
	II	94	148	26
Тамбов	I	122	145	87
	II	117	166	56

Примечание: I – зимы с 1964/1965 по 1989/1990 г.; II – зимы с 1990/1991 по 2011/2012 г.

По данным станции Рыльск, изменений нет ни в средних, ни в экстремальных значениях продолжительности. Наиболее значимые различия числа дней со снежным покровом получены нами по станции Богородицкое-Фенино, где средняя продолжительность увеличилась на 10 дней, а максимальная на 20 дней. Однако основной вклад здесь вносят бесснежные зимы 1964/1965 и 1967/1968 гг., когда за зиму было всего 18 и 32 дня со снежным покровом соответственно. Если исключить их из анализа, то и по этой станции получаются незначительные изменения продолжительности.

На рис. 2 показаны отклонения продолжительности залегания снежного покрова от среднего, нормированные на стандартное отклонение за весь исследуемый период по станции Тамбов. Аналогичные отклонения нами получены и по другим станциям. Здесь

периодом залегания мы считаем период от даты установления снежного покрова в начале зимы до его полного разрушения весной. Этот период нельзя в полной мере назвать периодом с устойчивым снежным покровом, т. к. в ЦЧО, особенно в юго-западных районах, довольно часто высота снега небольшая, и при сильных оттепелях он сходит.

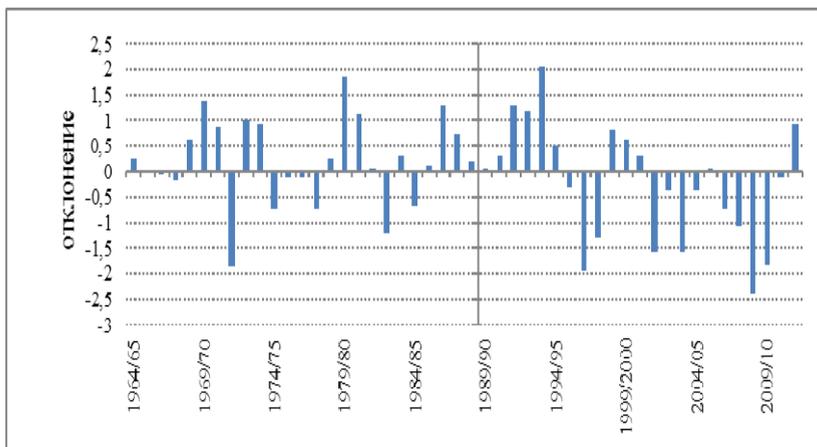


Рис. 2. Нормированные отклонения продолжительности залегания снежного покрова по станции Тамбов.

Можно видеть, что для периода с 1990 по 2012 г. характерны отклонения в отрицательную сторону: зимы стали короче по сравнению с периодом с 1964 по 1990 г. Также можно отметить, что увеличилась частота аномальных по продолжительности зим. Например, по данным станции Тамбов, в период до 1990 г. было четыре длинных зимы и две коротких (8 % за 26 лет), а после 1990 г. уже три и семь (32 % за 22 года) соответственно. По станции Богородицкое-Фенино частота коротких зим увеличилась с 19 до 50 %.

Резюмируя вышесказанное, можно утверждать, что в средняя многолетняя продолжительность периода залегания снежного покрова осталась на прежнем уровне, но существенно увеличилась ее межгодовая изменчивость.

Не изменилось и число лет с высоким (более 30 см) снежным покровом. По данным В.А. Моисейчик, условия для зимовки посевов ухудшаются, если высокий снежный покров залегает более 5 декад. На западе и юге ЦЧО (Рыльск, Богородицкое-Фенино, Каменная Степь) такое явление бывает крайне редко (наблюдалось лишь в 1966/1967, 1967/1968 и 2005/2006 гг.). На востоке региона (Тамбов) высокий снежный покров, залегающий в течение 2 месяцев и более, наблюдается примерно в 20 % лет, причем частота повторения снежных зим не меняется.

Далее были проанализированы даты установления и разрушения снежного покрова. По всем четырем станциям получается, что устойчивый снежный покров в период после 1990 г. устанавливается примерно на неделю позже по сравнению с периодом с 1964/1965 по 1989/1990 год.

Анализируя тренды дат установления и разрушения снежного покрова, можно уловить следующую тенденцию. Первые коэффициенты линейного тренда дат установления снежного покрова положительные, т. е. снег ложиться позже, а дат разрушения – отрицательные, т. е. сходит раньше. Однако достоверность аппроксимации линейных трендов мала, так как в этом регионе могут наблюдаться как короткие зимы с бесснежными «окнами», так и длительные зимы.

В качестве примера на рис. 3 приведены данные по станции Богородицкое-Фенино (юго-запад ЦЧО). Видно, что наибольшая высота снежного покрова наблюдается уже в конце января – начале февраля, а не как прежде в конце февраля – начале марта. Такое смещение дат можно объяснить как увеличением числа оттепелей во вторую половину зимы, теплыми и ранними веснами, так и обильными снегопадами в начале зимы, связанными с прохождением южных циклонов [8].

Аналогичное распределение было получено и для других станций. Что касается изменения средних за выделенные периоды значений высоты снега, то они не велики. Наиболее значимы различия в высоте снега до и после 1990 г. получены для южной части ЦЧО, но и здесь они составляют всего 2–5 см, что никоим образом не может сказаться ни на режиме газообмена зимующих растений, ни на влагообеспеченности посевов весной.

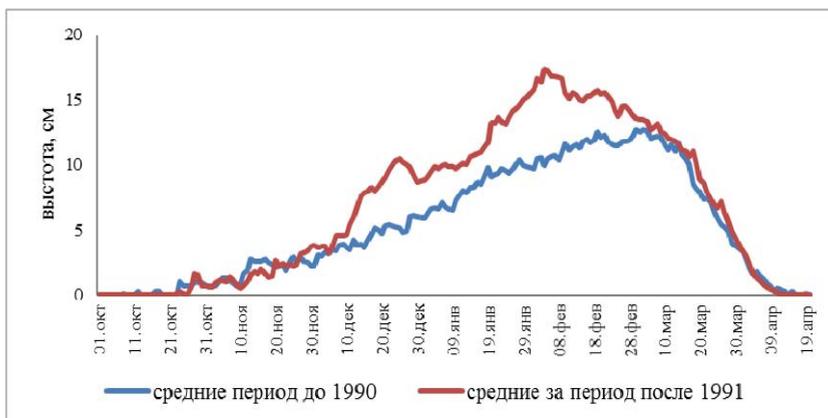


Рис. 3. Средняя высота снежного покрова по станции Богородицкое-Фенино.

Наиболее значимые изменения в режиме снежного покрова произошли в некотором смещении дат наступления и схода, а также дат с наибольшей за зиму высотой снежного покрова, но период залегания снежного покрова и число зим с продолжительным залеганием высокого снежного покрова остался практически без изменений. Таким образом, можно утверждать, что высказанный ранее тезис о возможном увеличении вероятности выпревания посевов при большой длительности залегания снежного покрова является лишь гипотетическим.

Ледяная корка

Образование в снежном покрове ледяной корки, особенно притертой к почве, также ведет к повреждению озимых, но в меньшей степени, и влияние ее на урожайность озимых слабее. Но в отдельные годы (1965, 1971, 1977, 1981, 1995 гг.), особенно когда ее распространение на полях зимой совпадает с сильными морозами, повреждения бывают значительными [12].

Детальный анализ распространения ледяной корки достаточно затруднителен, так как это явление имеет локальный характер, связанный с особенностями рельефа местности и, следовательно, с особенностями стока талой воды и распространения волн тепла

в снежном покрове. Нельзя исключить, что ледяные корки не диагностируются только потому, что маршрутная снегосъёмка «не увидела» ее. Поэтому в агрометеорологической литературе указывается на негативное влияние притертой ледяной корки, но динамика развития и последствия ее влияния на посевы озимых культур приводятся лишь по отдельным авторским экспериментам или наблюдениям на базе сортоучастков и т. п. Определенное развитие этого вопроса достигнуто в рамках математического моделирования характеристик снежного покрова [4]. Больше внимание уделяется анализу условий формирования ледяной корки.

Примером такой аномалии может служить зима 1964/1965 г., детальный агрометеорологический анализ которой был проведен В.А. Моисейчик [10]. Однако интересно проследить синоптические условия формирования ледяной корки в ряде районов ЦЧО в январе 1965 года.

По данным, любезно предоставленным отделом долгосрочных прогнозов погоды Гидрометцентра России, в декабре 1964 г. над территорией юга европейской России господствовал вынос теплого воздуха, обусловленный активной циклонической деятельностью на полярном фронте. Адвекция теплого воздуха была столь значительной, что температура повышалась до 5...8°. Осадки в декабре 1964 г. выпадали в виде дождя. Затем в первой декаде января 1965 г. резко похолодало. Похолодание было обусловлено прохождением холодного фронта 6 января, причем на синоптических картах можно проследить, что осадки на фронте выпадали в виде дождя, а последующий заток холодного и сухого воздуха из Сибири привел к быстрому замерзанию влаги на поверхности почвы, промерзанию почвы и понижению температуры на глубине узла кушения озимых до -15...-12°, что могло быть опасным для слабо-развитых посевов.

Интересно отметить, что развитие атмосферных процессов над европейской частью России зимой 2015/2016 гг. аналогичен вышеизложенному, за тем исключением, что в этом году похолоданию предшествовали снегопады, обеспечившие лучшие условия для растений. Зимой 2015/2016 гг. температура почвы на глубине узла кушения озимых понижалась до некритичных значений (-6...-8°).

В конце января при потеплении (на фоне положительной температуры днем и отрицательной ночью) наблюдалось образование ледяной корки на отдельных полях, но толщина ее была небольшой (менее 1 см), и губительного действия на посевы сельскохозяйственных культур она не оказала.

Приведенный пример лишний раз доказывает важность анализа конкретных событий, так или иначе влияющих на зимовку сельскохозяйственных культур, а не ограничиваться лишь рассмотрением общих закономерностей.

Суровость зимы

Для комплексной оценки условий зимнего периода А.В. Поповым [14] был предложен параметр W_i – суровость зимы:

$$W_i = \frac{\Delta T}{\sigma_T} + \frac{\Delta R}{\sigma_R},$$

где T – температура воздуха; R – количество осадков; Δ – отклонения от средней величины; σ – среднее квадратическое отклонение. Для расчета используются значения этих метеоэлементов, осредненные за три месяца (с декабря прошлого года по февраль текущего года). При разделении зим приняты следующие градации параметра W_i : суровая (менее -2,0), малоснежная и холодная (от -1,9 до -0,6), нормальная (-0,6...0,6), многоснежная и теплая (более 0,6). Такое разделение зим в целом соответствует принятому разделению по градациям аномалии температуры воздуха. Линейная корреляция температуры воздуха и параметра W_i составляет 0,70–0,75.

На рис. 4 приведена динамика индекса суровости зимы для двух областей за весь исследуемый период. Эти области были выбраны как самая теплая (Белгородская обл.) и самая холодная (Тамбовская обл.) из всех ЦЧО.

Можно утверждать, что в последние десятилетия в ЦЧО зимы стали более теплыми и многоснежными, что должно положительно повлиять на зимовку растений. Если в период до 1990 г. из 32 зим 14–18 (45–60 %) были холодными, а теплыми и многоснежными

лишь 8–12 (25–38 %), то в период после 1990 г. за 22 года холодных зим было лишь 4–8 (18–36 %), зато теплых уже 7–11 (33–50 %).

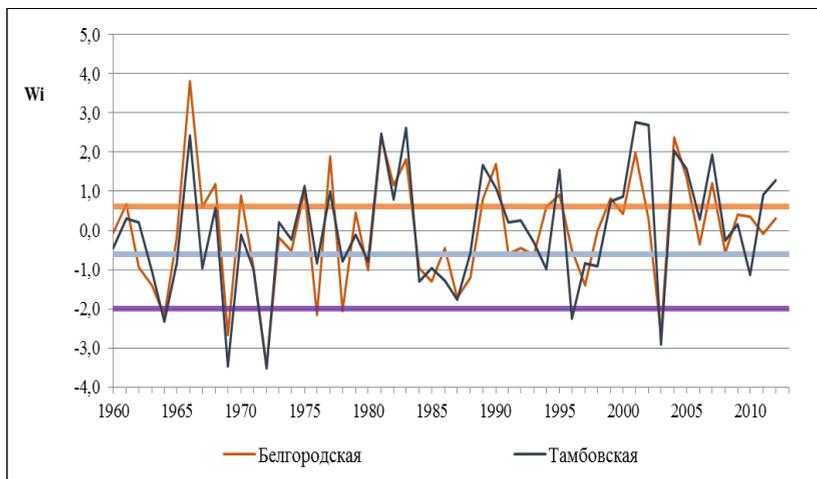


Рис. 4. Параметр W_i – суровость зимы по Белгородской и Тамбовской областям.

В целом по ЦЧО в среднем за периоды с 1959/1960 по 1989/1990 и с 1990/1991 по 2011/2012 гг. параметр суровости зимы изменился мало (с -0,4...-0,2 до 0,2...0,4), однако в первую очередь нам важно наличие тенденции к улучшению условий зимовки.

Перезимовка озимых

Рассмотренные изменения в термическом и снеговом режиме в первую очередь, проявляются в заметном снижении площадей с плохим состоянием посевов весной (рис. 5). Анализируя представленную динамику, нужно учитывать, что рассматриваются повреждения посевов не только от вымерзания и других неблагоприятных условий зимовки, но определенный вклад вносят и условия осени. На рис. 5 видно, что средний уровень процента гибели озимых в период после 1990 г. существенно ниже, нежели в предшествующий период.

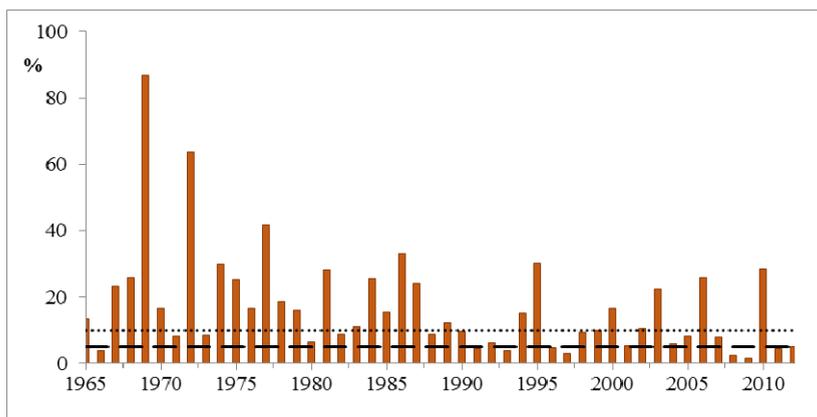


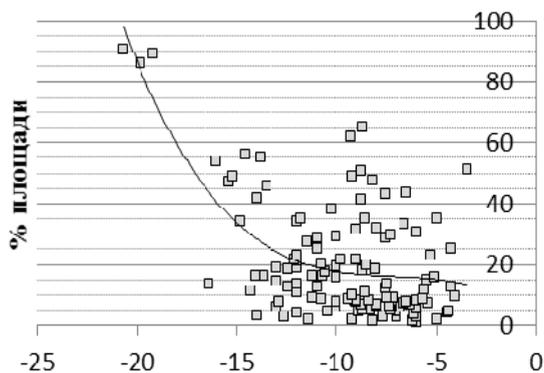
Рис. 5. Гибель озимых зерновых культур в ЦЧО по данным на весну в % посевной площади.

На рис. 5 пунктирной линией показан уровень 5 %, соответствующий по А.И. Яковлеву «совершенно незначительной гибели», и коротким пунктиром показан уровень 10 % – «небольшая гибель, практически не влияющая на конечную урожайность» [20]. В период с 1965 по 1990 г. таких зим с небольшой гибелью (менее 10 % посевов) было всего семь, т. е. менее 30 % от всех зим, а с незначительной (менее 5 %) лишь одна.

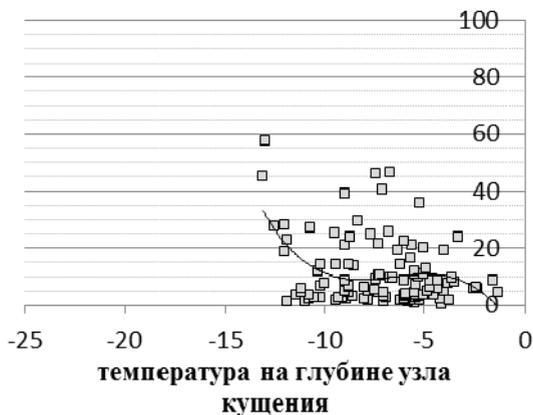
В период с 1990 г. такие зимы стали нормой – с небольшой гибелью было уже 15 зим, или почти 70 %, с незначительной – семь (более 30 %). Более того, в этот период было лишь три зимы с большой гибелью посевов (плохое состояние посевов на 20 % площадей и более): 1994/1995, 2005/2006 и 2009/2010 гг. – годы с неблагоприятными условиями в период осенней вегетации.

В среднем за период с 1965 по 1990 г. процент с плохим состоянием посевов весной в ЦЧО варьировал от 17 до 26 %, в период с 1990 г. он понизился до 8–13 %. Уменьшилась и изменчивость этой величины. Среднее квадратическое отклонение процента площадей с плохим состоянием в период до 1990 г. было 20–24 %, а после 1990 г. оно составляло всего 7–16 %. На рис. 5 видно, что максимальный уровень гибели посевов за зиму в этот период не превышает обычного для предшествующего периода.

Однако связано ли заметное улучшение сохранности посевов только с изменением агрометеорологических условий зимовки? На рис. 6 приведены зависимости площадей с плохим состоянием озимых зерновых культур весной от средней по области минимальной за зиму температуры почвы на глубине узла кушения.



а)



б)

Рис. 6. Зависимость площадей с плохим состоянием озимых весной (в % от посевной) от средней по области минимальной за зиму температуры почвы на глубине узла кушения (3 см): зимы 1965/1966–1989/1990 гг. (а), 1990/1991–2011/2012 гг. (б).

Для каждого периода построен полиномиальный «тренд». Полином 3 порядка выбран, с одной стороны, как наиболее статистически значимый (с наибольшей величиной коэффициента аппроксимации), так и для того, чтобы показать агрофизические закономерности процесса (резкое нарастание гибели посевов при понижении температуры ниже критической). Как уже указывалось, плохое состояние и гибель озимых культур в период зимовки зависят от многих факторов, а не только от термического режима почвы, поэтому приведенное на рис. 6 облако точек довольно широко. Вместе с тем этому фактору традиционно уделяется повышенное внимание в силу того, что из всех агрометеорологических факторов наибольший вред посевам причиняет именно вымерзание.

Видно, что линия за период с 1990 г лежит существенно ниже линии за период до 1990 г. Так, при понижении температуры почвы на глубине узла кушения до -10° средняя гибель была около 20 % (рис. 5 а), а в настоящее время (после 1991 г.) она составляет около 5 % (рис. 5 б), т. е. в настоящее время отклик зимующих посевов на неблагоприятные условия слабее, нежели он был в период до 1990 г.

Столь резкие изменения можно объяснить только изменениями в технологии сельскохозяйственного производства и сменой сортосостава озимых зерновых культур, так как сопоставимо резких изменений в условиях среды не произошло, о чем указывалось выше. По мнению большинства видных ученых Ф.М. Куперман, В.М. Личикаки, В.А. Моисейчик, И.И. Туманова, А.М. Шульгина, А.И. Яковлева и др., перезимовка растений определяется не только критическими минимумами температуры, но и всей агротехникой подготовки почвы, посева и ухода за растениями в осенний, зимний и ранневесенний периоды, способствующей проявлению потенциальной устойчивости сорта, либо, наоборот, ведущей к ее снижению.

Полученные зависимости чрезвычайно важны для оперативного мониторинга условий зимовки и для оценки вымерзания озимых культур. Современный метод прогноза вымерзания базируется на зависимостях, полученных по уже устаревшим данным, а поэтому требует некоторой переработки.

Выводы

Таким образом, в ЦЧО наблюдаемые изменения климата благоприятны для зимовки озимых зерновых культур, так как из-за потепления зим вероятность вымерзания посевов в этом регионе сократилась. Улучшение агротехнического потенциала и целенаправленная селекционная работа значительно повысили устойчивость озимых зерновых культур к неблагоприятным условиям зимовки. Поэтому можно ожидать существенного увеличения урожаев этих культур в ЦЧО, что, безусловно, положительно скажется на продовольственном обеспечении населения России.

Автор выражает благодарность Т.А. Максименковой, Н.А. Богомоловой, В.А. Тищенко и Н.В. Сатиной за предоставленные материалы и консультации.

Работа выполнена в рамках НИР Росгидромета 1.1.7.1(1) «Метод долгосрочного прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур с учетом условий перезимовки озимых культур в Черноземной зоне России».

Список использованных источников

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н. Снежный покров на территории России и его пространственные и временные изменения за период 1966–2010 гг. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2011. – Т. 24. – С. 211–227.

2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1008 с.

3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Колебания и изменения климата на территории России // Известия РАН. ФАО. – 2003. – Т. 39, № 2. – С. 66–185.

4. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Модель для расчета характеристик снежного покрова на основе данных стандартной метеорологической сети // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 352. – С. 85–102.

5. Куперман Ф.М., Пономарев В.И. Диагностика зимостойкости озимых зерновых культур. – М.: ВНИИТЭИСХ МСХ СССР, 1971. – 133 с.

6. Личикаки В.М. Перезимовка озимых культур. – М.: Колос, 1974. – 207 с.

7. Мещерская А.В., Белянкина И.Г., Голод М.П. Мониторинг толщины снежного покрова в основной зернопроизводящей зоне бывшего

СССР за период инструментальных наблюдений // Известия РАН. Серия географ. – 1995. – № 4. – С. 101–111.

8. *Мирвис В.М., Гусева И.П.* Изменения в режиме оттепелей на территории России // Труды ГГО. – 2007. – Вып. 556. – С. 101–115.

9. *Моисейчик В.А.* О продолжительности залегания мощного снежного покрова и перезимовке озимых культур // Метеорология и гидрология. – 1964. – № 9. – С. 10–16.

10. *Моисейчик В.А.* Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 295 с.

11. *Моисейчик В.А., Шавкунова В.А.* Агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая озимой ржи. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 165 с.

12. *Моисейчик В.А., Богомолова Н.А., Страшная А.И., Максименкова Т.А.* Влияние глобального изменения климата на агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая озимых зерновых культур в России за последние 50 лет // Труды ВНИИСХМ. – 2007. – Вып. 36. – С. 106–132

13. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата.* – М.: Росгидромет, 2008. – 227 с.

14. *Попов А.В.* О возможности прогноза теплых многоснежных и холодных зим малоснежных зим // Труды Гидрометцентра СССР. – 1975. – Вып. 156. – С. 77–84.

15. *Попова В.В.* Структура многолетних колебаний высоты снежного покрова в Северной Евразии // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 8. – С. 78–88.

16. *Сиротенко О.Д.* Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования. – М.: Росгидромет, 2007. – 77 с.

17. *Туманов И.И.* Физиологические основы зимостойкости растений. – М.; Л.: Сельхозиздат, 1940. – 366 с.

18. *Федоров В.А., Козлобаев В.В., Власова Л.М.* Зимостойкость, урожай и качество зерна разных сортов озимой твердой пшеницы в условиях лесостепи Воронежской области // Вестник ВГАУ. – 2012. – № 2. – С. 22–26.

19. *Шульгин А.М.* Климат почвы и его регулирование. – Л.: Гидрометиздат, 1967. – 302 с.

20. *Яковлев А.И.* Климат и зимостойкость озимой пшеницы. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 419 с.

Поступила в редакцию 01.02.2016 г.

О ДИНАМИКЕ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСЛОВИЙ СЕВА, ЗИМОВКИ И ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ ОСНОВНЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Р.М. Вильфанд, А.И. Страшная, О.В. Береза

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
ais@metcom.ru*

Общая характеристика термических ресурсов вегетационного осенне-зимнего периода

В настоящее время общепризнано, что глобальное изменение климата и его влияние на окружающую среду является одной из главных проблем XXI века. Участвовавшие в ряде районов Планеты засухи, стихийные лесные пожары, ураганы и наводнения увеличивают масштабы социально-экономических потерь, а также затрат на решение задач, связанных с этими проблемами [1]. Главным фактором наблюдаемых изменений климата на преобладающей территории Российской Федерации признается прогрессирующее потепление, особенно в последние десятилетия, что уже в настоящее время вызывает необходимость учитывать этот фактор в деятельности погодозависимых отраслей экономики, среди которых одно из первых мест занимает агропромышленный комплекс [9, 16].

В материалах Второго оценочного доклада Росгидромета [2] отмечается, что в «в последней четверти XX века – начале XXI века для формирования продуктивности сельскохозяйственных культур в России благоприятными факторами оказались рост теплообеспеченности, повышение средней температуры холодного периода года, увеличение продолжительности вегетационного

периода». Изменение увлажненности на территории сельскохозяйственных районов в целом тоже были благоприятными, кроме отдельных районов Сибири и Черноземного центра. Негативным последствием наблюдаемого потепления является смещение к северу и востоку зон обитания и массового размножения некоторых вредителей и зон распространения возбудителей болезней сельскохозяйственных растений. Приведенные во Втором оценочном докладе результаты исследований по изменению климата и предложенные необходимые меры адаптации сельского хозяйства к наблюдаемым изменениям относятся в основном к крупным регионам и, на наш взгляд, должны дополняться региональными исследованиями. Это связано с тем, что для России с ее чрезвычайно выраженной природно-климатической зональностью изменения термического режима, и особенно режима увлажнения, и других агроклиматических характеристик в различных районах существенно различаются по своему характеру. Эти изменения и различия, прежде всего в количественном аспекте, как и исследования по изменению агроклиматических условий возделывания отдельных культур или групп культур (озимые, ранние яровые, поздние яровые и др.), прежде всего необходимы для разработки неотложных практических мер по адаптации сельскохозяйственного производства к меняющимся климатическим и агроклиматическим ресурсам отдельных территорий или регионов, а также для выработки конкретных рекомендаций. Таких исследований пока проведено мало. В большинстве известных работ исследования изменений климата проводились в разрезе сезонов года и года в целом [3, 4, 8, 9]. В то же время стратегия адаптации земледелия к изменению климата предполагает проведение исследований по оценке последствий наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений и связанной с ними устойчивости производства как общей продукции растениеводства, так и продуктивности отдельных сельскохозяйственных культур не только на федеральном, но и на региональном уровне, на уровне субъектов. Наши исследования направлены на определение количественных показателей изменения агроклиматических ресурсов с целью осуществления информационной поддержки при разработке мер адаптации сельского хозяйства регионов к этим изменениям.

Изменение агроклиматических показателей условий осенне-зимнего периода

Для формирования структуры площадей, отводимых под различные сельскохозяйственные культуры в том или ином регионе, хозяйствующему субъекту (земледельцу) необходимо знать, как изменились в количественном отношении агроклиматические условия не только сезонов года в целом, но и их изменения внутри вегетационного или осенне-зимнего периодов. Так, например, если увеличивается повторяемость весенне-летних засух (май-июнь), это неблагоприятно для ранних яровых зерновых культур, и предпочтение в севооборотах следует отдать более поздним культурам. При увеличении засух в июле-августе, наоборот, выгоднее больше площадей занимать ранними яровыми зерновыми культурами и т. д.

В связи тем, что скорость изменения термических ресурсов в вегетационный и осенне-зимний периоды существенно различаются, для конкретного субъекта весьма важно знать, как изменилась сумма активных температур выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – основной показатель агроклиматических ресурсов в вегетационный период в условиях потепления климата.

Наши исследования термических ресурсов были проведены за период 1966 по 2015 г. Они показали, что на преобладающей территории европейской части России за последние 50 лет ресурсы тепла существенно изменились.

На рис. 1 показаны изменения сумм активных температур выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в среднем по субъектам) за период с 1991 по 2015 г. по сравнению с периодом 1966–1990 гг.

Значительные изменения (увеличение сумм активных температур воздуха выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $190\text{--}240\text{ }^{\circ}\text{C}$) произошли на западе Северо-Западного, в большинстве субъектов Центрального и Приволжского, а также в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах. Результаты расчетов позволяют сделать важный для практики вывод о том, что северная граница сумм температур выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, равная, например, $2400\text{--}2450\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспеченная в 90 % лет, в настоящее время существенно продвинулась к северу и проходит по южным районам Брянской, Орловской, Рязанской областей,

Республики Мордовия и далее к югу от Казани, Бугульмы (Республика Татарстан) и Уфы (Республика Башкортостан), где появилась возможность возделывать такую экономически выгодную теплолюбивую культуру, как подсолнечник, причем не только скороспелые, но и высокопродуктивные раннеспелые сорта и гибриды, вегетационный период которых длится 85–90 дней.

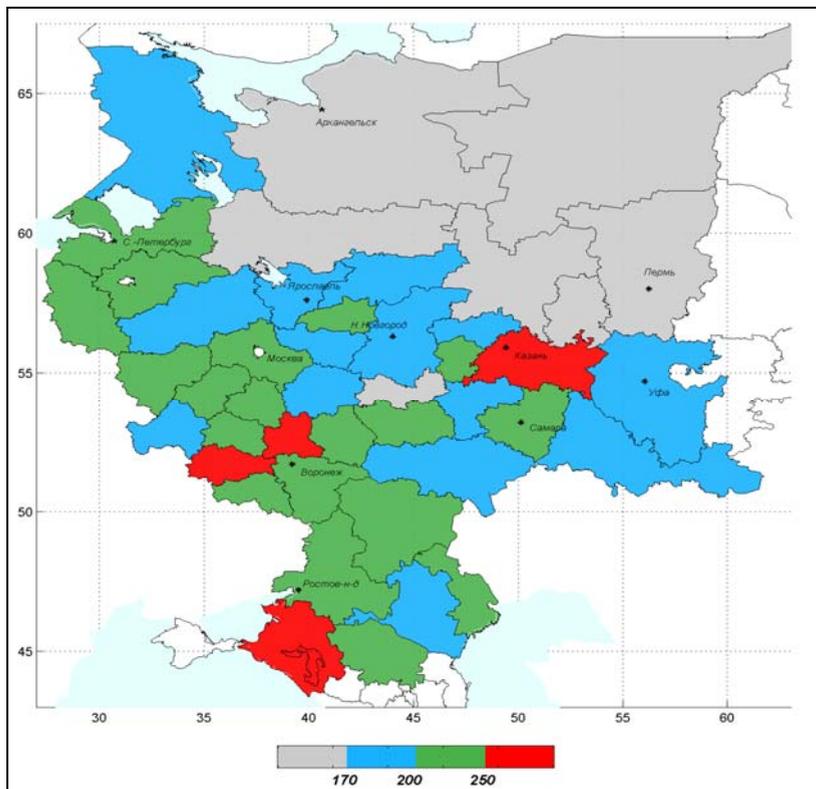


Рис. 1. Изменение сумм активных температур воздуха выше 10 °С в период 1991–2015 гг. по сравнению с периодом 1966–1990 гг.

Отметим, что опыт ряда хозяйств в последние годы подтверждает целесообразность возделывания подсолнечника в этих районах для получения маслосемян: по данным Росстата, средняя

по Рязанской и Орловской областям урожайность семян подсолнечника, например, в 2013 г. составила 17,5 и 24,1 ц/га соответственно, что является рентабельным для хозяйств этих субъектов. В южных районах европейской части в связи с большими суммами тепла, остающегося после уборки основных зерновых колосовых культур, появляется возможность для расширения посевов вторых (пожнивных) культур, что способствует более рациональному землепользованию и увеличению выхода растениеводческой продукции. Так, например, на большей части Южного федерального округа после уборки основной культуры – озимой пшеницы, по расчетам, остается еще сумма температур выше 10°C, равная 1400–1800 °С, что достаточно для созревания такой ценной белковой культуры, как горох, причем не только раннеспелых, но и среднеспелых сортов. Положительные последствия потепления климата характерны в разной степени для большинства районов европейской части России. Однако в ряде районов они таковыми не являются, о чем будет сказано ниже.

Так, благоприятным для большинства районов является увеличение повторяемости теплых зим. Наши исследования показали, что на преобладающей части Европейской территории России суммы отрицательных температур воздуха ниже 0 °С в период 1991–2015 гг. уменьшились по сравнению с периодом 1966–1990 гг. на 150–200 °С и более (рис. 2), что благоприятно для зимовки озимых зерновых культур.

Такой вывод справедлив лишь для районов, где преобладающей причиной повреждений и гибели озимых культур является вымерзание. В северо-восточных районах европейской части России, где снежный покров обычно бывает высоким, а почва промерзает при этом не глубоко, а в отдельные годы остается даже талой, агрометеорологические условия зимовки озимых культур при потеплении, напротив, ухудшились. Это обусловлено тем фактом, что температура почвы на глубине узла кущения озимых (3 см), которая является комплексным показателем условий зимовки, повысилась в среднем до значений, при которых при длительной в этих районах зимовке происходят процессы выпревания [7]. При этом возникает необходимость подбора сортов озимых культур, устойчивых к выпреванию.

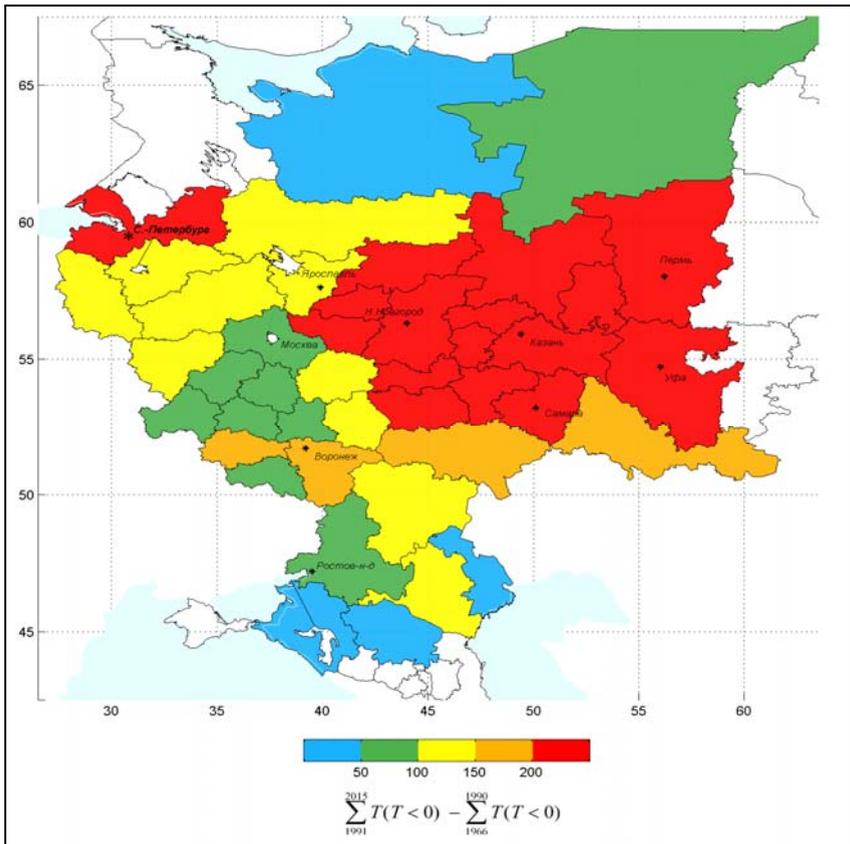


Рис. 2. Изменение сумм отрицательных температур воздуха (°C) в период 1991–2015 гг. по сравнению с периодом 1966–1990 гг.

Рассмотрим более подробно изменение комплексного показателя условий зимовки озимых культур – минимальной температуры почвы на глубине залегания узла кущения. За рассмотренный нами период (с 1973 по 2014 г.) в северо-восточных районах средняя по субъектам температура на глубине 3 см (по Кировской и Ярославской областям, например) повышалась в среднем со скоростью 0,6 °C/10 лет и в конце периода составила, соответственно, -3,5 и -3,7 °C (рис. 3).

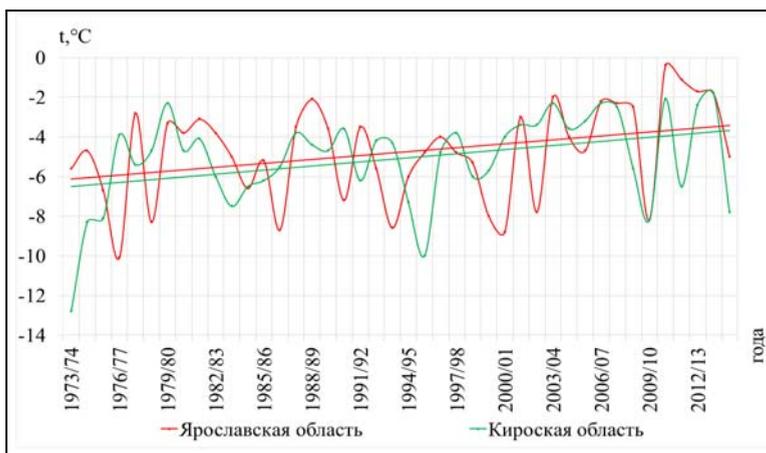


Рис. 3. Динамика минимальной температуры почвы на глубине узла кущения озимых зерновых культур (3 см) по Ярославской и Кировской областям за период с 1973/1974 по 2013/2014 гг.

В таких температурных условиях в период зимовки повреждение растений вследствие выпревания увеличиваются. Следствием этого процесса в северо-восточных районах явилась положительная динамика площадей озимых культур в плохом состоянии после возобновления вегетации их весной. Однако в целом по Российской Федерации площади озимых культур в плохом состоянии весной уменьшаются, так как наибольшие площади озимых сосредоточены в южных районах европейской части, где основной причиной, как указывалось выше, является вымерзание при небольшом снежном покрове. Средняя температура почвы на глубине 3 см здесь также повысилась, и вероятность вымерзания посевов значительно уменьшилась. Это явилось благоприятным фактором, и площади повреждений и гибели озимых весной (S_B) в России в целом (в связи с большим удельным весом озимых в южных районах) в период наблюдавшегося «потепления зим» уменьшались.

Как можно видеть на рис. 4, площадь с плохим состоянием озимых культур весной в целом по Российской Федерации за период с 2004/2005 по 2014/2015 г. уменьшилась с 12 % (от общей посевной площади) в начале периода до 7,5 % в конце его.

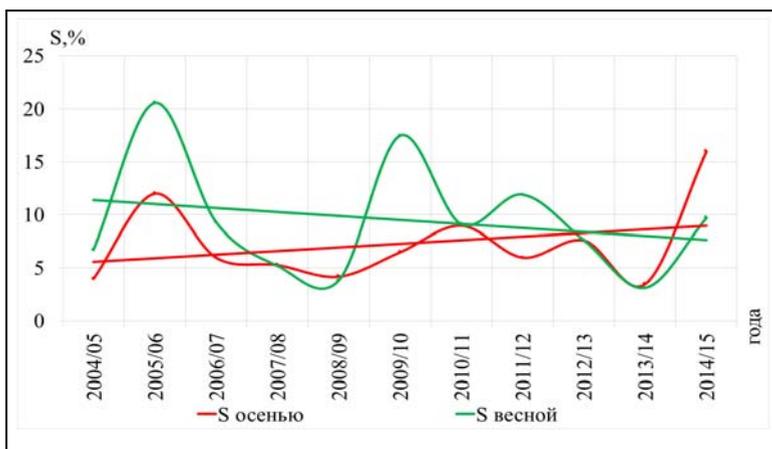


Рис. 4. Динамика площадей с плохим состоянием озимых зерновых культур осенью и весной в % от общей посевной площади по России за период с 2004/2005 по 2014/2015 г.

При этом, как известно, большой вклад в исход зимовки озимых культур вносят сроки и условия сева и осенней вегетации растений, которые определяют их состояние после прекращения вегетации [7, 12]. В зависимости от этих условий он колеблется от 15 до 40 %. Известно, что площадь озимых зерновых культур в плохом состоянии весной S_v , как и других травянистых растений [7], включает в себя площадь в плохом состоянии посевов осенью S_o и площадь повреждений их в зимний период S_z , т. е. $S_v = S_o + S_z$. Чаще всего большие площади S_o наблюдаются из-за засух в период сева и вегетации растений осенью (август-сентябрь), особенно в Черноземной зоне [7]. Наиболее характерно это для южной половины Приволжского, юго-востока Центрального и северных районов Южного федеральных округов, что, естественно, прямым образом отражается на площади озимых в плохом состоянии осенью в целом по России. На рис. 4 показана динамика площадей с плохим состоянием озимых осенью по Российской Федерации. За период с 2004/2005 по 2014/2015 г. в целом по Российской Федерации она увеличивалась ежегодно на 0,34 % (от 5,5 % в начале периода до 9,0 % в конце).

Динамика площадей с плохим состоянием озимых культур осенью в качестве примера по Ростовской и Кировской областям показана на рис. 5, где видно, что в Ростовской области S_o увеличилась к концу рассматриваемого периода, а в Кировской области практически не изменилась.

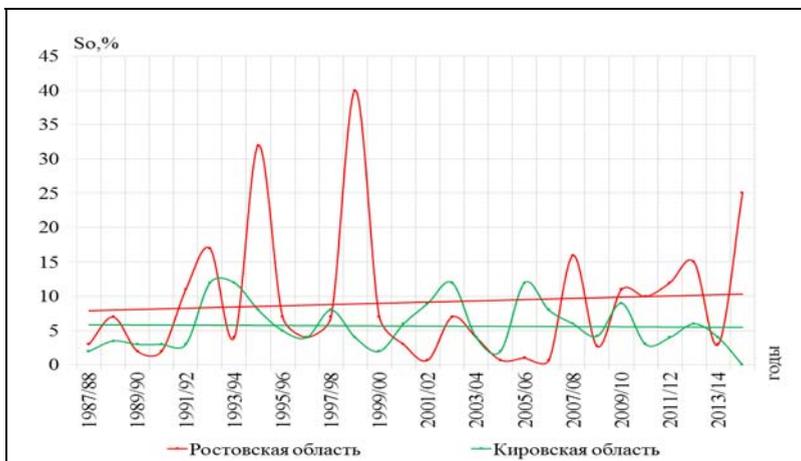


Рис. 5. Динамика площадей с плохим состоянием озимых зерновых культур осенью в % от общей посевной площади по Ростовской и Кировской областям за период с 1987/1988 по 2014/2015 г.

На рис. 6 также показана динамика площадей озимых в плохом состоянии весной в этих субъектах, где, напротив, наблюдается значительное уменьшение S_v к концу периода в Ростовской области, а в Кировской области площадь с плохим состоянием озимых культур весной увеличилась.

В связи с тем, что, основной причиной плохого состояния озимых культур осенью являются засухи [7, 12], для определения рисков засух на европейской части России нами была создана база данных по основному агрометеорологическому параметру, который характеризует условия увлажнения и атмосферные засухи – гидротермическому коэффициенту увлажнения Г.Т. Селянинова (ГТК), который численно равен отношению суммы осадков (ΣP) к сумме температур (ΣT), уменьшенной в 10 раз: $ГТК = \Sigma P / 0,1 \Sigma T$.

Расчеты велись за основной период сева и вегетации (август и сентябрь). ГТК за эти месяцы рассчитывались в среднем по субъектам Центрального, Приволжского, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов.

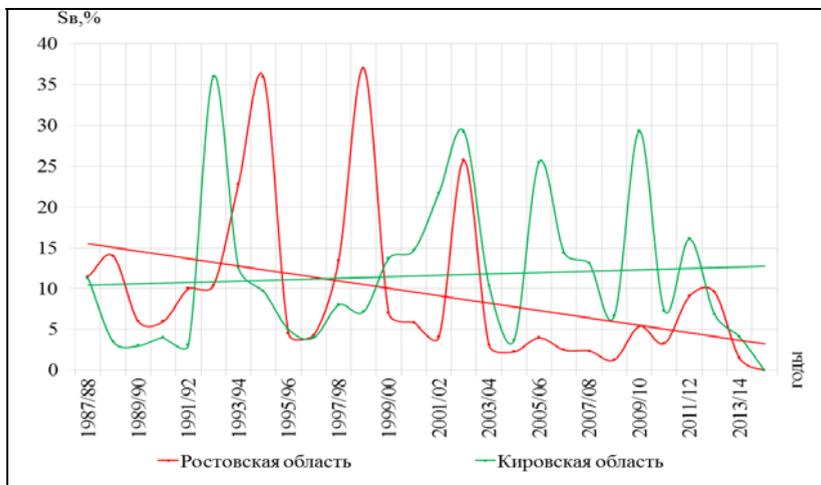


Рис. 6. Динамика площадей с плохим состоянием озимых зерновых культур весной в % от общей посевной площади по Ростовской и Кировской областям за период с 1987/88 по 2014/2015 г.

Проведенный анализ значений ГТК по годам показал, что наибольшие площади с плохим состоянием посевов наблюдались в годы сильных засух, т. е. когда значение ГТК в среднем по субъектам было 0,60 и менее. Так, например, за последние десять лет значительные площади с плохим состоянием озимых в Российской Федерации (до 10–15 % от общей посевной площади, а в ряде субъектов Черноземной зоны до 20–30 %) наблюдались в условиях сильных засух в этих субъектах осенью 2005, 2009 и 2015 гг., что наглядно показано на рис. 4.

В связи с изложенным, по каждому субъекту указанных выше округов за период с 1966 по 2015 г. нами были рассчитаны риски (вероятность, %) сильных засух ($ГТК \leq 0,60$) в августе и сентябре. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Риски сильных атмосферных засух (ГТК $\leq 0,60$) за период
1966–2015 гг.**

Субъект	Вероятность, %	
	август	сентябрь
Центральный федеральный округ		
Белгородская область	40	32
Брянская	20	16
Владимирская	22	6
Воронежская	50	36
Ивановская	16	10
Калужская	24	8
Костромская	8	4
Курская	32	20
Липецкая	30	20
Московская	12	4
Орловская	30	10
Рязанская	20	16
Смоленская	12	8
Тамбовская	44	34
Тверская	6	2
Тульская	30	12
Ярославская	10	2
Приволжский федеральный округ		
Республика Башкортостан	18	16
Марий-Эл	16	14
Мордовия	26	18
Татарстан	26	18
Чувашия	26	20
Удмуртская Республика	14	8
Кировская область	6	2
Нижегородская	16	10
Оренбургская	58	36
Пензенская	30	20
Самарская	38	34
Саратовская	56	34
Ульяновская	34	20
Пермский край	10	6

Субъект	Вероятность, %	
	август	сентябрь
Южный и Северо-Кавказский федеральный округ		
Республика Калмыкия	84	70
Волгоградская область	70	54
Ростовская	78	36
Краснодарский край	50	28
Ставропольский край	38	40

Из таблицы видно, что вероятность сильных засух в августе во всех округах значительно превосходит вероятность этого опасного агрометеорологического явления в сентябре, при этом наиболее часто сильные засухи наблюдаются в юго-восточных районах Приволжского федерального округа и северных районах Южного. Так, в Оренбургской, Саратовской, Волгоградской и Ростовской областях сильные засухи в августе наблюдались в основном в 6–7 годах из 10 лет, в Самарской, Белгородской, Воронежской, Тамбовской, Липецкой, Орловской, Рязанской областях и Краснодарском крае в 3–5 годах из 10. В сентябре вероятность засух в большинстве субъектов не превышает 10–18 %, однако в Самарской, Саратовской, Оренбургской, Тамбовской, Белгородской, Воронежской и Ростовской областях такие засухи в сентябре наблюдались в 32–36 % лет, что создает крайне неблагоприятные агрометеорологические условия для сева, появления всходов и развития озимых культур, обуславливает изреженность посевов и резкое ухудшение их состояния. Сроки сева в таких случаях передвигаются на более поздние, что создает угрозу слабого развития растений к концу вегетации и, следовательно, увеличивает вероятность их повреждений в зимний период. На юге Южного федерального округа и в Ставропольском крае в сентябре риски сильных засух такие же, но в этих районах осень более продолжительна, и средние многолетние сроки сева здесь приходится в основном на сентябрь.

Проведенный анализ погодичных скользящих значений ГТК в августе за 1982–2015 гг. на преобладающей территории европейской части России выявил существенное уменьшение значений ГТК от начала к концу периода. При разделении этого периода

на два подпериода (1982–1998 и 1999–2015 гг.) выявилось, что вероятность засух во втором периоде была значительно больше, чем в первом, т. е. наблюдалась тенденция увеличения рисков сильных засух в августе. Изменение рисков (вероятности сильных засух) показано на рис. 7.

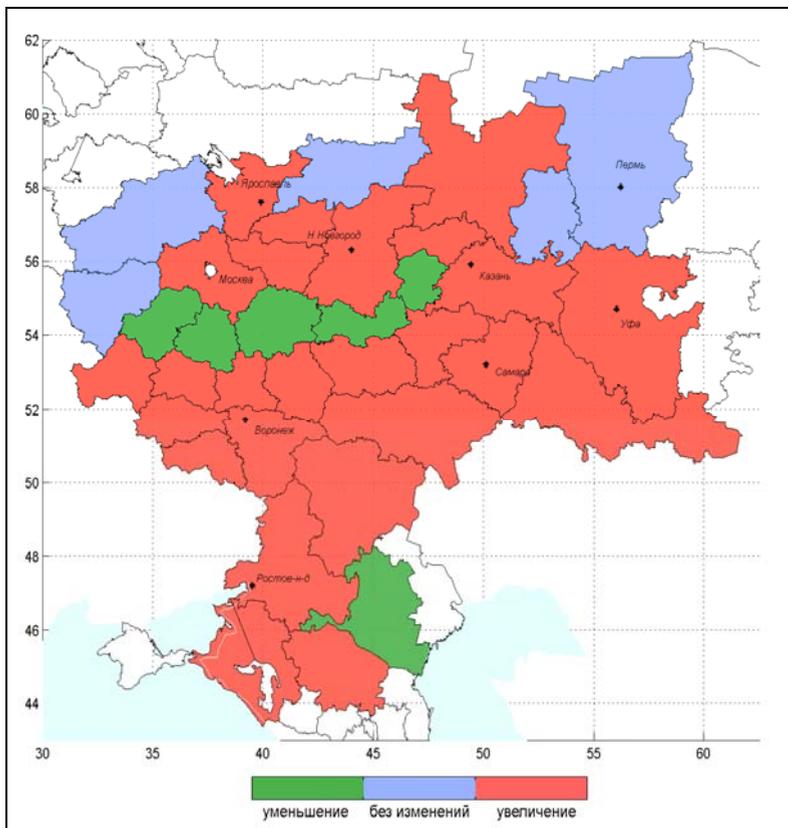


Рис. 7. Изменение рисков сильных атмосферных засух в августе за период 1999–2015 гг. по сравнению с 1982–1998 гг.

Как видно на приведенном рисунке, в большинстве субъектов вероятность сильных засух увеличилась (в основном на 11–20 % и более). Можно также констатировать, что не изменилась

вероятность таких засух в эти периоды лишь на крайнем северо-востоке территории (Пермский край, Удмуртская Республика и Костромская область), где они весьма редки, и на северо-западе (Тверская, Смоленская области). В Калужской, Тульской, Рязанской областях, республиках Мордовия и Чувашия вероятность сильных засух в августе несколько уменьшилась (в основном на 6–10 %).

Изменчивость значений ГТК по годам (среднее квадратичное отклонение этого показателя) во втором периоде, как показали расчеты, также увеличилась, особенно в субъектах, где засухи наиболее часты (в южной половине Приволжского, на юго-востоке Центрального и севере Южного федеральных округов). В табл. 2 в качестве примера показаны средние значения ГТК и среднее квадратическое отклонение СКО этого показателя, рассчитанное по годам указанного периода по Центральному федеральному округу.

Таблица 2

Изменчивость увлажнения (СКО) в августе в ЦФО за периоды 1982–1998 и 1999–2015 гг.

Субъект	1982–1998 гг.		1999–2015 гг.	
	Среднее значение ГТК	СКО	Среднее значение ГТК	СКО
Белгородская область	0,86	0,41	0,65	0,49
Брянская	1,20	0,69	1,01	0,56
Владимирская	1,24	0,57	1,06	0,55
Воронежская	0,73	0,33	0,56	0,38
Ивановская	1,27	0,65	0,99	0,53
Калужская	1,24	0,82	1,18	0,69
Костромская	1,50	0,71	1,32	0,55
Курская	0,96	0,35	0,78	0,63
Липецкая	0,85	0,39	0,83	0,62
Московская	1,35	0,68	1,20	0,62
Орловская	1,21	0,63	0,95	0,76
Рязанская	0,92	0,43	0,99	0,51
Смоленская	1,41	0,98	1,33	0,66
Тамбовская	0,75	0,32	0,74	0,46
Тверская	1,51	0,70	1,42	0,58

Можно отметить, что во втором периоде в большинстве субъектов округа среднее значение ГТК в августе было существенно меньше, чем в первом, т. е. увлажнение в этом периоде в целом уменьшилось. Изменчивость условий увлажнения (изменчивость ГТК) существенно увеличилась в основном в черноземных областях, а также в Орловской, Тульской, Рязанской областях. В большинстве нечерноземных областей округа изменчивость во втором периоде была в основном меньше, чем в первом. Наибольшее увеличение СКО во втором периоде наблюдалось в Курской, Липецкой и Тамбовской областях (на 30–45 %), в Воронежской и Белгородской областях – на 13–17 %.

В условиях увеличения повторяемости (вероятности, %) сильных засух в большинстве субъектов Черноземной зоны возникает необходимость отодвигать сроки сева на более поздние, т. е. на сентябрь, когда условия увлажнения по сравнению с августом улучшаются. В связи с этим необходимо было рассчитать оптимальные сроки сева, которые обеспечивали бы нормальное развитие растений (кустистость 3–4 побега) ко времени прекращения вегетации. Во многих случаях сдвиг сроков сева на более поздние бывает в этих районах вполне допустим, так как в связи с наблюдаемым потеплением продолжительность осенней вегетации озимых существенно увеличилась, что показано нами ранее [12] и оптимальные сроки сева в связи с этим изменились.

В данной работе были уточнены оптимальные сроки сева озимых с учетом последних семи лет (рис. 8). На рисунке показан также сдвиг расчетных оптимальных сроков сева на текущий период (в настоящее время) по сравнению с 1980–2004 гг. Использование на практике этих сроков сева может являться одной из предлагаемых адаптационных мер в изменившихся агроклиматических условиях (при увеличении повторяемости засух осенью и увеличившейся продолжительности осенней вегетации растений) и будет способствовать уменьшению площадей озимых в плохом состоянии осенью (изреженных и невзошедших). Однако следует заметить, что в связи с тем, что изменчивость условий увлажнения в большинстве районов черноземной зоны увеличилась, эта мера не исключает необходимости использования в период осеннего сева озимых культур составляемых в Гидрометцентре России

прогнозов погоды на месяц и десять дней, что в ряде случаев помогает скорректировать указанные сроки сева в зависимости от сложившихся в текущем году конкретных агрометеорологических условий.

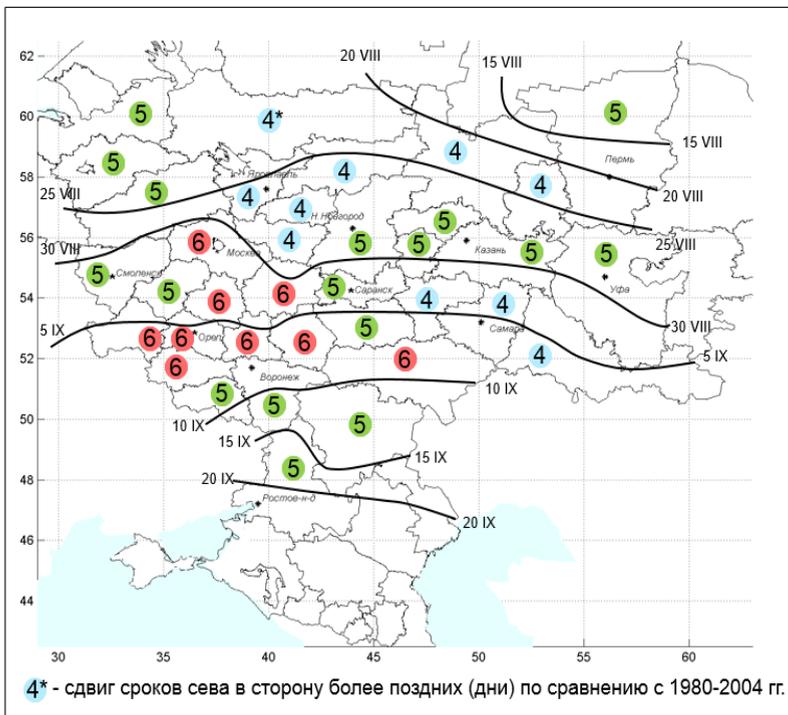


Рис. 8. Оптимальные сроки сева на европейской части России (2005–2014 гг.)

Динамика условий увлажнения и засух в основной период весенне-летней вегетации озимой и яровой пшеницы

Как известно, одной из наиболее важных стратегических задач АПК России является устойчивое производство зерновых культур для обеспечения потребностей населения и достижения приемлемого уровня продовольственной безопасности. Наблюдавшиеся значительные колебания урожайности и валовых сборов зерна в

нашей стране обусловлены в основном сильными засухами [6, 11, 13–15]. Они не только снижают урожайность зерновых культур, но и вызывают гибель посевов на больших площадях. Так, в 2009 г. от засухи погибли посевы (в основном зерновых культур) на площади 4,48 млн га, в наиболее жестокую засуху 2010 года гибель посевов наблюдалась на площади 13,3 млн га, в менее обширную и менее интенсивную засуху 2012 г. посевы погибли на площади 5,75 млн га, а в условиях локальных засух 2013 и 2015 гг. гибель посевов составляла, соответственно, 2,4 и 2,0 млн. га.

На рис. 9 а показана динамика урожайности зерновых и зернобобовых культур (с посевной площади) в Российской Федерации за последние 35 лет.

На основании анализа этой динамики можно судить о потерях (крупных недоборах урожая) по сравнению с общей положительной тенденцией урожайности за этот период.

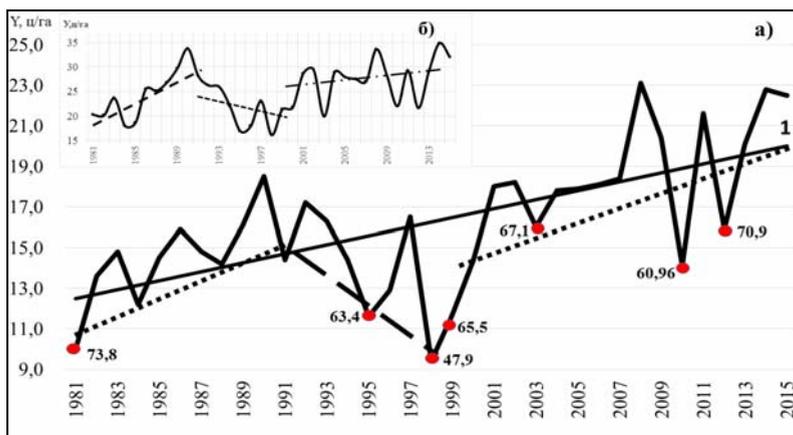


Рис. 9. Динамика урожайности (ц/га с посевной площади) зерновых и зернобобовых культур (а) и озимой пшеницы (б) за период с 1981 по 2015 г. (1 – линия тренда).

В то же время на основе анализа приведенных здесь же кусочно-линейных трендов, необходимо отметить, что в годы происходивших структурных изменений в сельскохозяйственной отрасли, ухудшением материально-технической базы хозяйств, снижением

количества удобрений в менее сильную и обширную засуху 1998 г., например, урожайность зерновых культур была на 35 % ниже, чем в наиболее жестокую засуху 2010 г., но наблюдавшуюся при более высоком агротехнологическом фоне.

Аналогичная ситуация выявляется и при анализе динамики урожая озимой пшеницы – основной зерновой культуры, которая дает около 40 % валового сбора зерна в стране (рис. 9 б). Почти в такой же степени влияние засух сказывается и на колебаниях урожайности яровой пшеницы – ценной продовольственной культуры. Отметим, что валовой сбор озимой и яровой пшеницы составляет около 60 % от общего валового сбора всех зерновых и зернобобовых культур. Основные площади озимой и яровой пшеницы сосредоточены на европейской части России, в связи с этим влияние условий увлажнения и атмосферных засух на их продуктивность проводилась нами на этой территории. В работах, выполненных нами, а также другими исследователями [6, 10, 11, 13–15] показано, что наибольшее влияние на урожайность зерновых колосовых культур, в том числе яровой и озимой пшеницы, в период весенне-летней вегетации оказывают условия увлажнения в мае-июне. На преобладающей территории Приволжского, южной половины Центрального и северных районов Южного федеральных округов эти условия можно считать наиболее важными или «критическими» для формирования урожая яровой и озимой пшеницы. Условия атмосферного увлажнения в период весенне-летней вегетации этих культур нами, как и в осенний период, характеризовались общепринятым в агрометеорологии и в смежных областях гидротермическим коэффициентом увлажнения Г.Т. Селянинова (ГТК) [14].

На первом этапе исследований условий увлажнения и засух применительно к возделыванию яровой и озимой пшеницы была сформирована база данных рассчитанных в среднем по субъектам значений ГТК за май, июнь и в среднем за май-июнь за период с 1966 по 2015 год.

По всем субъектам европейской части России за основной период глобального потепления (1971–2010 гг.) были рассчитаны средние по десятилетиям этого периода значения ГТК за май и июнь (а также за последнее пятилетие с 2011 по 2015 г.).

Полученные данные осреднялись по округам (табл. 3). Анализ этих данных показывает, что в Центральном федеральном округе в мае самым «сухим» было второе десятилетие (1981–1990 гг.), когда в округе наблюдались две сильные засухи (1981 и 1984 гг.).

Таблица 3

Значения гидротермического коэффициента увлажнения (ГТК) в мае и в июне в федеральных округах европейской части России (1971-2015 гг.)

Годы	ЦФО	ПФО	ЮФО	СКФО
май				
1971–1980	1,52	1,01	0,81	1,03
1981–1990	1,02	1,03	0,86	1,33
1991–2000	1,29	1,23	0,95	1,40
2001–2010	1,22	1,06	0,94	1,48
2011–2015	1,10	0,73	0,91	1,32
июнь				
1971–1980	1,31	1,22	0,79	0,95
1981–1990	1,63	1,27	0,90	1,48
1991–2000	1,28	1,07	0,82	1,36
2001–2010	1,31	1,21	0,72	1,25
2011–2015	1,40	1,15	0,81	1,15

В Приволжском, Южном и Северо-Кавказском федеральных округах наиболее сухим в этом месяце было первое десятилетие (1971–1980 гг.), когда сильные засухи наблюдались в 1972, 1975 и 1979 гг. Отметим, что в Приволжском федеральном округе наиболее сухим оказалось и последнее пятилетие, когда засухи (в основном в юго-восточной половине округа) наблюдались в 2012 и 2013 гг. (в Оренбургской области сильная засуха наблюдалась и в 2015 г.). В июне в Центральном и Приволжском федеральных округах самым сухим было десятилетие 1991–2000 гг., засухи в этих округах наблюдались в 1995, 1998 и 1999 гг. (в Приволжском федеральном округе и в 1991 г.). В Южном федеральном округе очень сухим в июне оказалось десятилетие 2001–2010 гг., сильные засухи и недобор урожая озимой пшеницы здесь наблюдались в 2002, 2003, 2007 гг., а в Северо-Кавказском федеральном округе

(Ставропольский край) засушливым был период 1971–1980 гг., когда сильные засухи отмечались в 1975, 1979 гг. Из приведенных данных следует, что определенной тенденции в условиях увлажнения по округам в целом по десятилетиям не выявлено и для оценки засушливости территорий таких данных недостаточно, в основном в связи с их малой информативностью из-за осреднения очень разных по увлажнению территорий. Так, в Южном и Приволжском федеральных округах различия в условиях увлажнения в южных и северных районах этих округов весьма значительны, а осреднение нивелирует различия в агроклиматических ресурсах территорий.

В более ранних работах [6, 10, 13, 14] было показано, что наибольшее влияние на урожайность зерновых колосовых культур в основных зерносеющих районах европейской части России оказывают условия увлажнения в мае-июне. Влияние увлажнения на урожайность озимой и яровой пшеницы в современных изменившихся агрометеорологических условиях (1991–2015 гг.) в качестве примера показано на рис. 10 по Республике Татарстан и Оренбургской области, где приводятся зависимости урожайности этих культур от среднего за май-июнь гидротермического коэффициента ($ГТК_{V-VI}$).

Как видно на рисунке, наиболее четко прямая зависимость (коэффициент корреляции равен 0,80) урожайности яровой пшеницы от условий увлажнения в мае-июне (или от $ГТК$ за май-июнь) наблюдается в Республике Татарстан. Уравнение такой зависимости, например, имеет вид: $Y = 16,054ГТК_{V-VI} + 5,953$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,64$, по Оренбургской области $R^2 = 0,47$. Близки по значениям они и в других субъектах Приволжского федерального округа, а также на севере Южного и юго-востоке Центрального федеральных округов. В связи с этим можно заключить, что в среднем более 50 % изменчивости урожайности яровой пшеницы по годам определяются условиями увлажнения в мае-июне. Отметим, что связь урожайности озимой пшеницы с $ГТК_{V-VI}$ несколько менее тесная, коэффициент детерминации в полученных уравнениях для озимой пшеницы не превышает 0,36–0,44, в связи с чем примерно лишь до 40 % изменчивости урожайности по годам описываются условиями увлажнения в мае-июне. Это можно объяснить большой ролью весенних влагозапасов в почве, когда

озимая пшеница уже вегетирует и хорошо использует весеннюю влагу, а яровая пшеница только сеется, а также определенным влиянием на урожайность озимой пшеницы осенне-зимних условий. С учетом установленной значимости условий увлажнения в мае-июне основное внимание в исследованиях уделялось анализу этих условий и анализу засух.

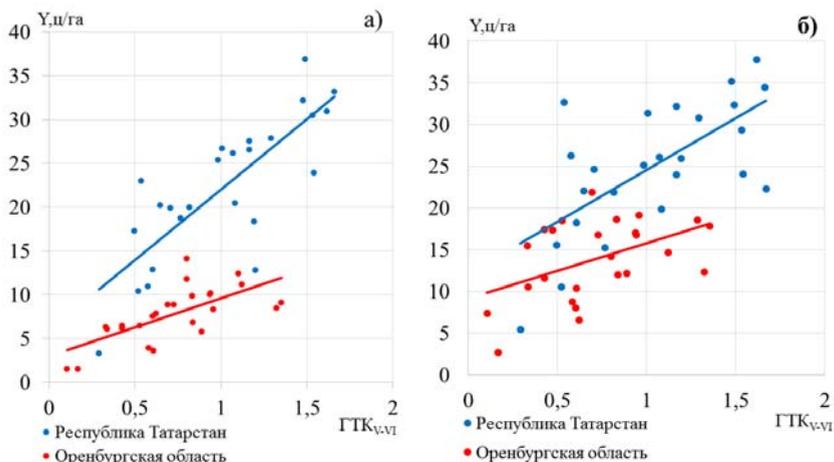


Рис. 10. Зависимость урожайности яровой (а) и озимой (б) пшеницы от гидротермического коэффициента за май-июнь по Республике Татарстан и Оренбургской области.

Засушливость территорий обычно характеризуют основываясь на анализе повторяемости как сильных, так и средних атмосферных засух. Как известно, сильные засухи за любой период (не менее месяца) характеризуются $ГТК \leq 0,60$, средние – $ГТК = 0,61-0,80$ и слабые – $ГТК = 0,81-1,00$ [14]. Наибольшее потери зерна обуславливают сильные засухи, а во многих случаях и средние. Слабые засухи обычно мало влияют на формирование урожая.

На европейской части России засушливость с точки зрения влияния ее на формирование урожая озимой и яровой пшеницы характеризовалась нами на основе проведенных расчетов рисков

(вероятность, %) сильных и средних засух без их разделения (т. е. рисков $ГТК_{v-vI} \leq 0,80$). Вероятность таких засух за период с 1966 по 2015 г. в мае-июне представлена на рис. 11.

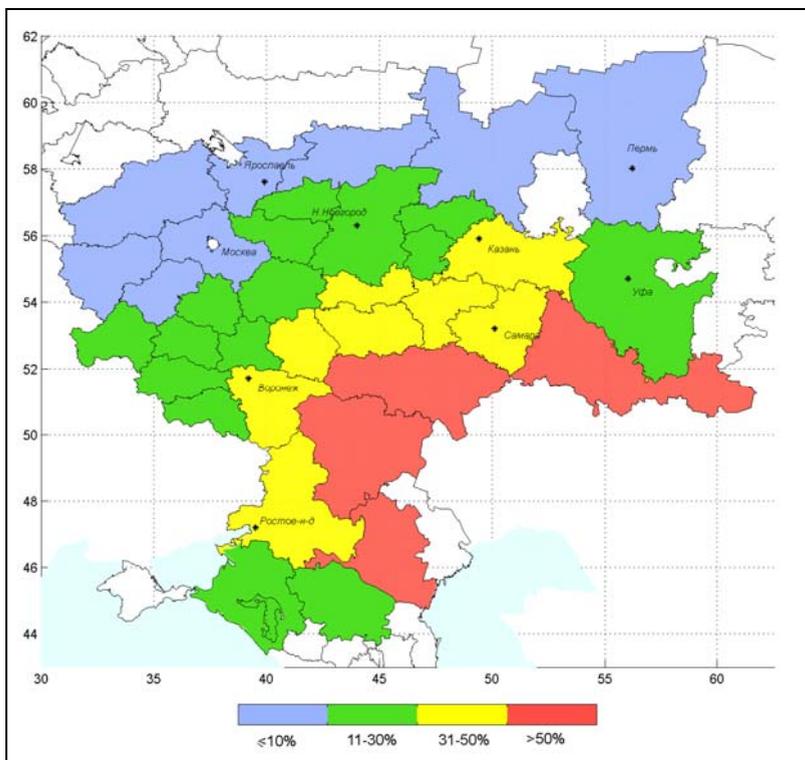


Рис. 11. Вероятность (%) атмосферных засух ($ГТК \leq 0,80$) в мае-июне за период 1966–2015 гг.

Из анализа рис. 11 можно сделать вывод, что риски этих засух в мае-июне (т. е. вероятность значений $ГТК_{v-vI}$, равных 0,80 и менее) в республиках Татарстан и Мордовия, в Самарской, Ульяновской, Пензенской, Тамбовской, Воронежской и Ростовской областях значительны и наблюдаются в трех-пяти годах из десяти лет. Наиболее значительные риски засух (в шести-семи годах из десяти лет) наблюдаются в Саратовской, Оренбургской, Волгоградской

областях и в Республике Калмыкия. Эта территория на европейской части России самая засушливая и наиболее важным мероприятием для адаптации к наблюдающимся засушливым условиям является мелиорация. В Курской, Калужской, Белгородской, Орловской, Липецкой, Тульской, Рязанской, Ивановской, Владимирской, Нижегородской областях, республиках Марий Эл, Чувашия, Башкирия и Удмуртии, а также в Краснодарском и Ставропольском краях вероятность таких засух составляет в основном 15–20 %, а на остальной территории зерносеющих районов европейской части она не превышает 4–10 % (в Тверской области за рассматриваемый период такой длительной засухи не наблюдалось).

В практическом земледелии для принятия оптимальных решений по адаптации к меняющимся агроклиматическим условиям важно знать не только риски засух в количественном выражении за какой-то период, но и их динамику или тенденцию изменений. Целесообразно, на наш взгляд, рассматривать ее за более короткий (тридцатилетний) период. С этой целью нами были рассчитаны риски сильных и средних засух в мае-июне ($ГТК \leq 0,80$) за период 2001–2015 гг. по сравнению с 1986–2000 гг. Результаты расчетов показаны на рис. 12.

Оказалось, что на территории Центрального федерального округа риски таких засух в 2001–2015 гг. увеличились по сравнению с 1986–2000 гг. на 7–20 % лишь в Московской, Владимирской, Ивановской и Костромской областях. В Тверской, Брянской, Липецкой и Воронежской областях они практически не изменились, а на остальной преобладающей территории округа риски средних и сильных засух уменьшились на такую же величину. В Приволжском федеральном округе увеличение рисков таких засух на 7–20 % наблюдалось в Саратовской, Оренбургской, Ульяновской областях и Республике Чувашия (в Самарской области на 34 %), т. е. на территории, где сосредоточены основные площади яровой и озимой пшеницы. Не изменились риски этих засух в Нижегородской, Кировской областях и Удмуртской Республике, а в остальных субъектах округа во втором периоде риски уменьшились на 7–20 %. Наиболее значительное изменение рисков сильных

и средних засух в мае-июне ($\text{ГТК} \leq 0,80$) наблюдалось в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах, где они увеличились в Ростовской области на 14 %, в Волгоградской области, Краснодарском и Ставропольском краях на 26–34 %. Лишь в Республике Калмыкия изменения рисков не наблюдалось.

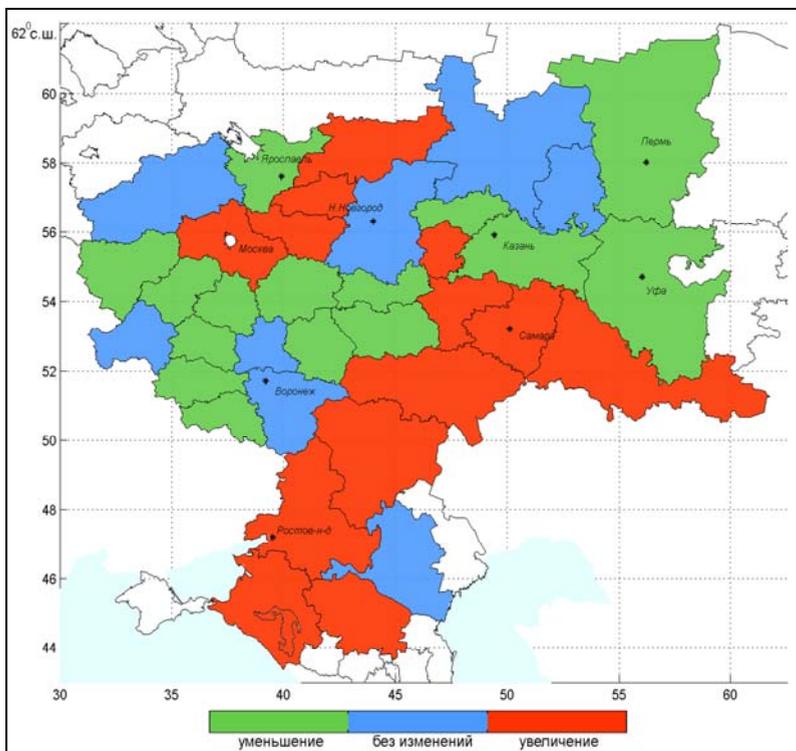


Рис. 12. Риски (вероятность, %) сильных и средних засух в мае-июне ($\text{ГТК} \leq 0,80$) за период 2001–2015 гг. по сравнению с 1986–2000 гг.

В связи с тем, что наиболее значительные колебания (снижение) урожайности зерновых культур обусловлены влиянием сильных засух ($\text{ГТК} \leq 0,60$), по субъектам европейской части России нами были рассчитаны риски (вероятность, %) таких засух в мае, июне и в среднем за май-июнь за период 1966–2015 гг. (табл. 4).

Таблица 4

Риски (вероятность, %) сильных засух (ГТК $\leq 0,60$) в мае, июне и мае-июне за период 1966–2015 гг.

Субъект	ГТК $\leq 0,60$		
	май	июнь	май-июнь
Центральный федеральный округ			
Белгородская область	22	16	8
Брянская	12	6	2
Владимирская	12	10	2
Воронежская	30	28	20
Ивановская	18	16	6
Калужская	10	8	4
Костромская	2	4	2
Курская	22	10	6
Липецкая	30	20	16
Московская	16	10	2
Орловская	16	10	4
Рязанская	28	14	6
Смоленская	8	2	2
Тамбовская	40	20	18
Тверская	4	6	0
Тульская	28	10	6
Ярославская	8	10	0
Приволжский федеральный округ			
Республика Башкортостан	26	18	12
Марий-Эл	22	14	12
Мордовия	36	14	18
Татарстан	38	28	18
Чувашия	26	16	10
Удмуртская Республика	18	10	4
Кировская область	4	6	0
Нижегородская	18	8	6
Оренбургская	42	30	34
Пензенская	32	12	18
Самарская	44	22	24
Саратовская	44	36	34
Ульяновская	32	20	24
Пермский край	6	2	0

Субъект	ГТК ≤ 0,60		
	май	июнь	май-июнь
Южный и Северо-Кавказский федеральный округ			
Республика Калмыкия	54	58	52
Волгоградская область	50	48	42
Ростовская	26	26	28
Краснодарский край	8	10	6
Ставропольский край	6	6	6

Из анализа таблицы следует, что наиболее часто сильные засухи в Центральном и Приволжском федеральных округах наблюдались в мае; в июне в большинстве субъектов этих округов риски таких засух несколько уменьшались – в основном на 7–12 %, а в Тамбовской, Пензенской, Самарской областях и Республике Мордовия на 20–22 %.

Риски сильных засух, когда в среднем за май-июнь значения ГТК ≤ 0,60 наблюдались в двух-трех годах из десяти, отмечены в Воронежской, Тамбовской, Пензенской, Ульяновской, Самарской, Саратовской, Оренбургской и Ростовской областях, республиках Татарстан и Мордовия; Волгоградской области и Республике Калмыкия вероятность таких засух составляла 42–52 %, т. е. такие засухи наблюдались в 4–5 годах из десяти.

Динамику изменения рисков сильных засух (ГТК ≤ 0,60) в мае-июне по субъектам европейской части России мы рассматривали также за последние тридцать лет (1986–2015 гг.), разделив этот период на два подпериода. На рис. 13 показано изменение рисков таких засух в 2001–2015 гг. по сравнению с 1986–2000 гг. В динамике этих засух прослеживается важная особенность: на большей части Центрального и особенно Приволжского федеральных округов риски сильных засух во втором периоде уменьшились (в основном на 7–13 %) либо практически не изменились. Увеличение рисков сильных засух наблюдалось в Воронежской, Самарской, Нижегородской, Владимирской, Костромской областях и Республике Марий Эл. В Южном федеральном округе риски сильных засух почти также уменьшились (на 7–14 %) только в Волгоградской области и Республике Калмыкия, однако в Ростовской

области и Краснодарском крае риски таких засух, напротив, увеличились на 13–26 %. Таким образом, в разных субъектах тенденции изменений частоты (вероятности, %) сильных засух оказались разнонаправленными.

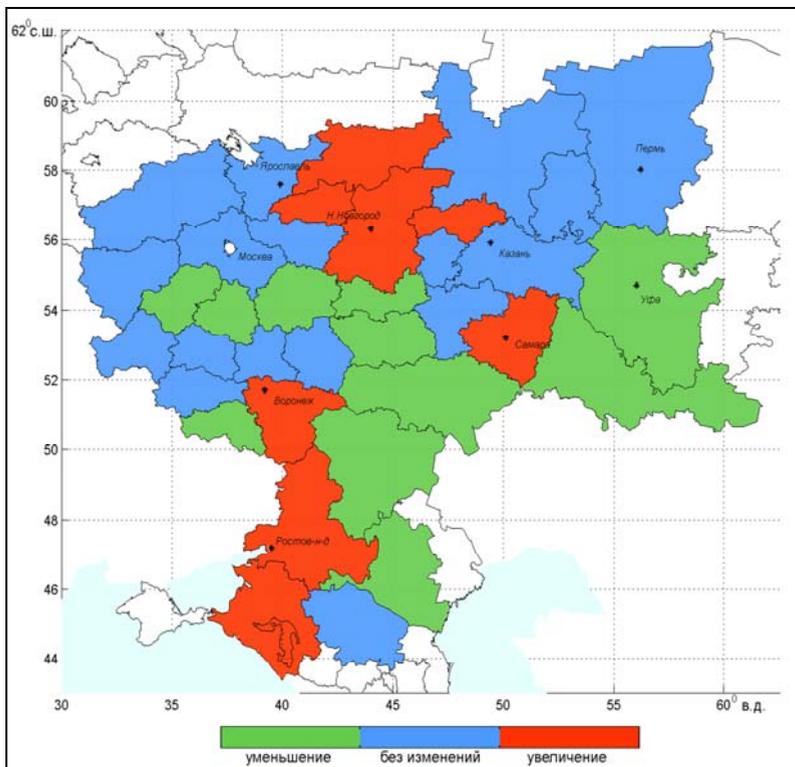


Рис. 13. Изменение рисков сильных засух (ГТК ≤ 0,60) в мае-июне в 2001–2015 гг. по сравнению с 1986–2000 гг.

Нами также была рассчитана изменчивость (среднее квадратическое отклонение СКО) условий увлажнения (погодичных значений ГТК за май-июнь) по субъектам Центрального, Приволжского, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов в 2001–2015 гг. по сравнению с 1986–2000 гг. (табл. 5).

Таблица 5

**Изменчивость условий увлажнения в мае-июне за 1986–2000 гг.
и 2001–2015 гг.**

Субъект	1986–2000 гг.		2001–2015 гг.	
	средн. ГТК	СКО	средн. ГТК	СКО
Центральный федеральный округ				
Белгородская область	1,19	0,38	1,08	0,28
Брянская	1,38	0,37	1,34	0,32
Владимирская	0,30	0,29	1,40	0,58
Воронежская	0,92	0,22	0,85	0,24
Ивановская	1,25	0,32	1,26	0,55
Калужская	1,49	0,39	1,49	0,34
Костромская	1,61	0,56	1,43	0,42
Курская	1,20	0,39	1,11	0,27
Липецкая	1,18	0,47	0,94	0,24
Московская	1,35	0,36	1,39	0,45
Орловская	1,31	0,37	1,19	0,28
Рязанская	1,09	0,53	1,16	0,33
Смоленская	1,53	0,49	1,60	0,52
Тамбовская	1,04	0,44	1,06	0,33
Тверская	1,51	0,55	1,58	0,32
Тульская	1,29	0,46	1,22	0,33
Ярославская	1,61	0,51	1,31	0,30
Приволжский федеральный округ				
Республика Башкортостан	1,05	0,45	1,12	0,45
Марий-Эл	1,13	0,40	1,06	0,42
Мордовия	1,10	0,43	1,09	0,36
Татарстан	1,05	0,42	1,03	0,41
Чувашия	1,13	0,41	1,03	0,32
Удмуртская Республика	1,37	0,55	1,27	0,49
Кировская область	1,52	0,50	1,43	0,35
Нижегородская	1,22	0,52	1,19	0,37
Оренбургская	0,75	0,37	0,72	0,32
Пензенская	1,03	0,48	1,04	0,33
Самарская	0,93	0,40	0,80	0,35
Саратовская	0,82	0,37	0,74	0,22
Ульяновская	1,14	0,53	0,91	0,35
Пермский край	1,72	0,71	1,52	0,42

Субъект	1986–2000 гг.		2001–2015 гг.	
	средн. ГТК	СКО	средн. ГТК	СКО
Южный и Северо-Кавказский федеральный округ				
Республика Калмыкия	0,68	0,30	0,73	0,25
Волгоградская область	0,78	0,34	0,64	0,18
Ростовская	0,92	0,22	0,80	0,25
Краснодарский край	1,38	0,37	1,17	0,42
Ставропольский край	1,44	0,39	1,32	0,38

В большинстве субъектов Центрального федерального округа существенных изменений средних по периодам ГТК, а также СКО практически не наблюдалось. Однако в Приволжском федеральном округе в большинстве субъектов среднее значение ГТК во втором периоде уменьшалось, т. е. этот период в среднем оказался «более сухим». Хотя значения СКО в среднем также уменьшались, колебания урожайности озимой и яровой пшеницы во многих субъектах оставались значительными. Так, например, на юго-востоке округа (в Оренбургской и Саратовской областях) наблюдалась тенденция снижения урожайности со скоростью 0,17 ц/га/год и 0,34 ц/га/год соответственно. В Саратовской области, например, снижение урожайности озимой пшеницы от начала к концу периода составило 4,5 ц/га, в Оренбургской области – 2,5 ц/га.

Значительное уменьшение ГТК и увеличение изменчивости увлажнения (увеличение СКО) во втором периоде наблюдалось в субъектах северных районов Южного федерального округа. В Ростовской области, например, СКО во втором периоде было примерно на 12 % большим по значению, чем в первом, при этом устойчивость урожаев озимой пшеницы на фоне ухудшения условий увлажнения уменьшалась. Тенденция средней по области урожайности была положительной (в основном за счет интенсивных технологий), но при этом погодичный прирост урожайности был небольшим и в целом за период урожайность увеличилась лишь на 2,0 ц/га.

Как известно из [5, 16], применительно к задачам оценки влияния изменений климатических (агроклиматических) условий при глобальном потеплении на производство растительной продукции

риск ассоциируется с вероятностью (климатической повторяемостью) потерь, превосходящих некоторый критический уровень, т. е. под риском недобора урожая, обусловленных неблагоприятным воздействием опасного погодного явления, понимаются хозяйственно значимые отклонения урожайности от средней многолетней величины.

Насколько близки риски сильных засух и значительного недобора урожая (в нашем случае из-за засух) можно определить, сопоставив количественные значения вероятности сильных засух в мае-июне, когда $ГТК \leq 0,60$, и недобора урожая (отклонений урожайности от средней многолетней) рассматриваемых культур за один и тот же период (в нашем случае 1986–2015 гг.). За критический уровень недобора урожая мы приняли отклонение средней по субъекту урожайности яровой и озимой пшеницы от среднего значения за период 1986–2015 гг., равное 20 % и более, т. е. такое значение отклонения урожайности от средней, когда в регионе создается угроза недостатка продовольственного зерна для бесперебойного обеспечения населения и других нужд и возникает необходимость его закупки за пределами региона.

Земледельцы при этом терпят убытки, особенно если посевы не застрахованы, так как наблюдается не только снижение урожайности, но часть посевов в условиях сильных засух может погибнуть. Повторяемость неурожайных лет (недобора урожая) рассчитывалась как отношение числа лет с урожайностью 20% и более от средней многолетней за рассматриваемый период к общему числу лет за тот же период. Результаты таких расчетов приведены в табл. 6.

Можно отметить, что для засушливых территорий риски (вероятность, %) сильных засух в мае-июне ($ГТК_{v-vi} \leq 0,60$), а по отдельным субъектам в июне, наиболее критичном периоде вегетации яровой пшеницы, близки по величине, а в отдельных субъектах они совпадают. Например, в Саратовской области вероятность сильных засух в мае-июне ($ГТК_{v-vi} \leq 0,60$) составляет 30 %, а вероятность недобора урожайности более 20 % от средней многолетней для преобладающей здесь яровой пшеницы тоже равна 30 %, а для озимой пшеницы – 33 %. В Воронежской области

вероятность $ГТК_{v_i} \leq 0,60$ составляет 20 % и вероятность недобора урожайности преобладающей в этом субъекте озимой пшеницы такая же. Аналогичная ситуация наблюдается и в Ростовской области, где риски недобора урожайности для озимой пшеницы, равно-го 20 % и более, и вероятности сильных засух в мае-июне совпадают.

Таблица 6

Риски сильных засух в мае-июне ($ГТК \leq 0,60$) и отклонений урожайности, равных 20 % и более (ΔY) от средней за 1986–2015 гг.

Территория	Вероятность, %		
	$ГТК_{v_i} \leq 0,60$	ΔY , яровая пшеница	ΔY , озимая пшеница
Республика Башкортостан	17 (23)*	27	23
Татарстан	20 (37)*	37	30
Оренбургская область	37	30	27
Самарская	23 (27)*	27	27
Саратовская	30	30	33
Ульяновская	20	27	17
Воронежская	13 (20)*	27	20
Тамбовская	13 (20)*	27	13
Ростовская	20	33	20

Примечание: * вероятность $ГТК \leq 0,60$ в июне.

Выводы

Результаты исследований показали, что суммы активных температур выше 10 °С на европейской части России увеличились в большинстве районов на 190–240 °С. Это позволяет возделывать теплолюбивые культуры, например подсолнечник, в более северных районах территории по сравнению с тем, что практикуется в настоящее время.

Потепление зим благоприятно для зимовки озимых зерновых культур на большей части европейской части России. На северо-востоке территории оно несколько ухудшило условия зимовки.

Показано, что в результате увеличения вероятности сильных засух в период сева и начала вегетации озимых культур осенью

возникает необходимость отодвигать сроки сева на более поздние. В условиях наблюдаемого увеличения продолжительности осенней вегетации рассчитаны новые оптимальные сроки сева озимых в изменившихся агроклиматических условиях.

Проведенные исследования рисков сильных, а также отдельно сильных и средних засух и динамики их изменений в мае-июне за последние 30 лет (1986–2015 гг.) выявили тенденцию увеличения этих рисков в последние 15 лет этого периода в южной половине Приволжского, на большей части территории Южного округов, а также в Ставропольском крае и Воронежской области. Эти районы обеспечивают значительную долю продовольственного зерна в стране. В связи с этим количественная оценка рисков засух весьма актуальна, особенно с учетом возможного усиления засушливости в зерновом поясе. Полученные результаты исследований могут способствовать информационной поддержке при разработке мероприятий по адаптации сельского хозяйства к изменениям агроклиматических условий.

Близость рисков сильных засух в мае-июне и рисков значительных недоборов урожая зерна озимой и яровой пшеницы указывают на возможность использования установленного положения на практике: если средний по субъекту гидротермический коэффициент за май-июнь (или июнь) меньше или равен 0,60 в конкретном году, то в конце июня (с большой заблаговременностью до конца уборки) уже можно предполагать, что снижение урожайности этих культур составит 20 % и более.

Результаты исследований в целом, как по осенне-зимнему, так и по весенне-летнему периодам, будут способствовать решению задач, стоящих перед АПК России, связанных с изменением агроклиматических ресурсов, адаптации к этим изменениям и разработкой мер по снижению рисков в сельскохозяйственном производстве, обусловленных опасными агрометеорологическими явлениями не только для яровой и озимой пшеницы, но и для других сельскохозяйственных культур. Эти меры должны предусматривать как внедрение влагосберегающих технологий, так и развитие орошения, что позволит получать устойчивые урожаи яровой и озимой пшеницы.

Для смягчения последствий воздействия неблагоприятных погодных условий в оперативном режиме необходимо совершенствование созданной в Росгидромете системы мониторинга состояния посевов и засух на основе комплексирования наземных и спутниковых данных, которая будет способствовать раннему обнаружению засух, оценке их интенсивности и заблаговременному принятию необходимых мер по уменьшению ущерба.

Список использованных источников

1. *Бедрицкий А.И., Коришунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.* Показатели влияния погодных условий на экономику: чувствительность потребителя к воздействующему гидрометеорологическому фактору // *Метеорология и гидрология.* – 2000. – № 2. – С. 5–9.

2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1008 с.

3. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Платова Т.В.* Оценка сезонных особенностей региональных проявлений изменения глобального климата // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* – 2010. – Т. 23. – С. 11–22.

4. *Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Черенкова Е.А.* Динамика засух в Европейской России в ситуации глобального потепления // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* – 2007. – Т. 21. – С. 160–182.

5. *Кобышева Н.В., Васильев М.П.* Уязвимость социальной сферы регионов России к опасным гидрометеорологическим явлениям // *Труды ГГО.* – 2015. – Вып. 578. – С. 59–73.

6. *Мещерская А.В.* О показателе засух и урожайности зерновых культур // *Метеорология и гидрология.* – 1988. – № 2. – С. 91–98.

7. *Моисейчик В.А.* Агрометеорологические условия перезимовки озимых культур. – Л.: Гидрометеозиздат, 1975. – 294 с.

8. *Семенов С.М., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Попов И.О., Титкина С.Н.* Распределение приповерхностной температуры на территории России и соседних стран при заданном уровне глобального потепления // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* – 2013. – Т. 25. – С. 29–41.

9. *Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н.* Динамика климатообразующих изменений теплообеспеченности и продуктивности

земледельческой зоны России // Труды ВНИИСХМ. – 2013. – Вып. 38. – С. 41–53.

10. *Страшная А.И.* Использование показателей увлажнения для оценки засушливости и прогноза урожайности зерновых культур в Поволжском экономическом районе // Труды Гидрометцентра России. – 1993. – Вып. 327. – С. 15–22.

11. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 194–214.

12. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* О сроках сева озимых культур в условиях изменения климата и их прогнозирование в Приволжском федеральном округе // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 175–193.

13. *Страшная А.И., Коренкова Н.В.* О засушливости в Среднем Поволжье и ее влиянии на урожайность яровой пшеницы // Труды Гидрометцентра России. – 2005. – Вып. 340. – С. 25–34.

14. *Уланова Е.С., Страшная А.И.* Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур // Труды ВНИИСХМ. – 2000. – Вып. 33. – С. 64–83.

15. *Фролов А.В., Страшная А.И.* О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли». – М.: Триада лтд, 2011. – С. 22–31.

16. *Якушев В.П., Иванов А.Л.* Оценка изменений климата и стратегия адаптации к ним земледелия // Сборник докладов международной научно-практической конференции, 7–11 декабря 2010 г. – М.: Изд. РГАУ МСХ им. К.А. Тимирязева, 2011. – С. 58–64.

Поступила в редакцию 25 мая 2016 г.

ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ И ВЛАГОПЕРЕНОС В ТРОПОСФЕРЕ ПРИЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА В ТЕПЛОЕ ПОЛУГОДИЕ

Т.Е. Данова¹, О.М. Прокофьев²

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

*²Одесский государственный экологический университет, Украина
danova8@mail.ru, leggg0707@rambler.ru*

Введение

Наиболее достоверным материалом для мониторинга климата являются температурно-влажностные характеристики. Перемещение воды на земном шаре и ее фазовые преобразования тесно связаны со всеми основными климатообразующими факторами и общей циркуляцией атмосферы. Атмосферная циркуляция является переносчиком влаги в атмосфере в газообразном и частично в жидком и твердом виде в облаках. Процессы влагообмена влияют на общую циркуляцию атмосферы путем изменения энергии в результате фазовых преобразований водяного пара, принимающего участие во влагообмене, и также являются продуктом общих климатообразующих факторов: радиации, циркуляции, свойств подстилающей поверхности [5, 10]. Истории исследования характеристик влагообмена более ста лет, и она тесно связана с именами О.И. Воейкова (1875, 1894, 1913 гг.), Э.А. Брикнера (1905 г.), С.И. Кашина, А.И. Бурцева, М.И. Будыко, О.А. Дроздова (1950–1956 гг.). Для Причерноморского региона ранее был проведен анализ статистических характеристик влагосодержания и влагопереноса [9, 11].

Данные об изменении элементов влагообмена позволяют проанализировать их природные колебания в годы экстремальных ситуаций: крупных аномалий температуры воздуха, активизации опасных явлений погоды, связанных с мощной

конвекцией, а также засушливых и переувлажненных лет. Изучение временных особенностей содержания водяного пара представляет интерес для анализа условий облакообразования и выпадения осадков, формирования грозового заряда, роста градовых зародышей в облаке. В связи с этим изучение современных тенденций, характерных для влагосодержания и влагопереноса в тропосфере Причерноморского региона, является актуальным вопросом. Кроме того, современные климатические изменения в виде повышения температуры воздуха значительно влияют на образование фактической естественной влаги в границах одной страны или объединенного региона [7, 8]. Для стран, входящих в исследуемый регион, информация о количестве переносимой влаги в тропосфере и о причинах формирования зон ее максимумов и минимумов может послужить основой для обеспечения продовольственной безопасности, повышения финансовой устойчивости предприятий агропромышленного комплекса и устойчивого развития сельских территорий.

Методика и материал исследования

Влагосодержание атмосферы в разных географических районах определяется количеством водяного пара в атмосфере, которое определяется температурой воздуха, адвективным и турбулентным переносами влаги, а также процессами испарения и конденсации.

Метод радиозондирования дает возможность определять запас водяного пара в атмосфере непосредственно из прямых измерений характеристик влажности воздуха на разных высотах, не учитывая при этом жидкокапельную и кристаллическую влагу. Погрешность измерения характеристик влажности при радиозондировании атмосферы составляет 1–5 % [17]. Метод является простым и достаточно надежным при корректном определении коэффициентов, учитывающих местные особенности распределения влаги в атмосфере. В работе использовались коэффициенты, которые позволяют избежать значительных погрешностей в расчетах влагосодержания тропосферы над пунктом [5, 10].

Методы расчета основных характеристик влагообмена были разработаны О.А. Дроздовым [10]:

$$W = \frac{1}{g} \int_{p_0}^p q dp, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; q – удельная влажность, г/кг; p , p_0 – давление на изобарических поверхностях, гПа.

Проведенные исследования показали, что значения влагосодержания атмосферы, рассчитанные с помощью параметра r – отношение смеси (г/кг), – отличаются на величину около 2 % от значений влагосодержания атмосферы, рассчитанных с использованием q – удельной влажности (г/кг) – величины, которая входит в стандартный набор результатов радиозондирования. В связи с очень незначительными отклонениями результатов было принято решение использовать в дальнейших расчетах параметр r .

Были использованы значения отношения смеси r (г/кг) на изобарических поверхностях от 1000 до 300 гПа:

$$W = 10(0,075r_0 + 0,150r_{850} + 0,175r_{700} + 0,10r_{500} + r_{400} + r_{300}), \quad (2)$$

где W – влагосодержание столба атмосферы в слое 1000–300 гПа, кг/м²; 0,075; 0,150; 0,175; 0,10 – коэффициенты (k^*), которые характеризуют часть массы атмосферы между изобарическими поверхностями.

Для решения ряда вопросов необходимо знать количество циркулирующей в атмосфере влаги независимо от направления потока. В работе получены средние значения переноса влаги для всех месяцев теплого периода года в слое Земля – 300 гПа для области, расположенной над Черным морем, а также над территорией стран, граничащих с ним или находящихся на пути перемещения воздушных потоков к Причерноморскому региону. Обычно уровень 300 гПа не включают в расчеты из-за малого влагосодержания, но, учитывая возможное развитие конвективной облачности до нижней границы стратосферы, принято решение рассчитывать влагоперенос до 300 гПа поверхности:

$$v_{(W)} = 10(0,075r_0v_0 + 0,150r_{850}v_{850} + 0,175r_{700}v_{700} + 0,10r_{500}v_{500} + r_{400}v_{400} + r_{300}v_{300}), \quad (3)$$

где $v_{(W)}$ – пронос влаги над станцией, кг/м·с; v_0, v_{850} и т. д. – модуль средней скорости ветра на поверхностях, м/с; r_0, r_{850} и т. д. – среднее значение отношения смеси на поверхностях, г/кг.

В качестве исходного материала в работе использовались среднемесячные значения отношения смеси и скорости ветра у поверхности Земли и на стандартных изобарических поверхностях (Земля – 300 гПа), полученные по данным радиозондирования тропосферы в Причерноморском регионе за теплый период года (апрель–сентябрь) с 1973 по 2012 г. в срок 00 ч ВСВ. Использовались данные 10 станций, расположенных на территории стран, входящих в Причерноморский регион (табл. 1).

Таблица 1

Государственная принадлежность аэрологических станций, их координаты и высота над уровнем моря

Станции	Координаты		Высота над уровнем моря, м	Годы	Период наблюдений, лет
	широта	долгота			
<i>Россия</i>					
Дивное	45,91	43,35	87	1973–2012	40
Ростов-на-Дону	47,25	39,81	78	1973–2012	40
Туапсе	44,10	39,03	95	1973–2012	40
<i>Турция</i>					
Анкара	39,95	32,88	891	1973–2012	40
Стамбул	40,96	29,08	39	1973–2012	40
<i>Румыния</i>					
Бухарест	44,50	29,13	91	1973–2012	40
<i>Украина</i>					
Киев	50,40	30,56	167	1973–2012	40
Львов	49,81	23,95	323	1973–2012	40
Одесса	46,43	30,76	42	1973–2012	40
Харьков	49,96	36,13	155	1973–2012	40

Выбор станций проводился с учетом длительности ряда наблюдений (40 лет). Данные радиозондирования атмосферы получены из базы данных университета штата Вайоминг (США) [1].

В связи с тем, что в исследуемом регионе применяются разные системы радиозондирования, аэрологические данные могут быть не вполне сопоставимы по точности. Во избежание этого были использованы результаты наблюдений с 1973 г., чтобы начальный материал был достаточно однородным и надежным. Этой же цели способствовало использование единого срока зондирования – 00 ч ВСВ.

Для выявления пространственно-временных закономерностей распределения влагосодержания и переноса влаги в тропосфере использовалась методика визуализации значений, полученных при статистической обработке материала.

Для расчета характеристик энергетического спектра влагосодержания и влагопереноса в тропосфере Причерноморья использовался алгоритм Фурье-анализа [6]. Учитывая, что в качестве случайной функции мы рассматриваем в том числе и влагоперенос в тропосфере Причерноморского региона, для расчета которого используются значения скорости ветра на изобарических поверхностях, в таком случае распределение дисперсий, имеющих квадрат размерности амплитуды, пропорционально плотности распределения энергии сигнала по частотам. Таким образом, спектральную плотность случайной функции можно рассматривать как «энергетический спектр» этой функции:

$$S_x(\omega) = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ (\Delta\omega \rightarrow 0)}} S_{X_T}(\omega_i) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_x(\tau) \cos \omega\tau \, d\tau, \quad (4)$$

где $S_{X_T}(\omega_i)$ имеет смысл средней плотности дисперсии на единицу частоты; $K_x(\tau)$ – ковариационная функция.

Функция $S_x(\omega)$ определяет плотность распределения дисперсии гармонических колебаний в зависимости от частоты и поэтому называется спектральной плотностью случайной функции $X(t)$. Поскольку для расчетов используется выборка, а не генеральная совокупность, то результатом расчетов будет являться не

сама характеристика, а ее оценка. Расчет статистической оценки спектральной плотности случайного процесса $\hat{S}(\omega)$ осуществлялся по формуле:

$$\hat{S}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\tau_{\max}}^{\tau_{\max}} e^{-i\omega\tau} \lambda(\tau) \hat{K}(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $\lambda(\tau)$ – сглаживающая функция («корреляционное окно»); i – мнимая единица.

Результаты исследования

Временные ряды метеорологических величин содержат периодические компоненты, обусловленные волновой природой атмосферных процессов. Одним из методов, позволяющим выявить скрытые периодичности, является интегральное преобразование Фурье. Получены следующие характеристики: амплитуда i -й гармоники (A_i), ее частота (ω_i), начальная фаза (φ_i), косинус- и синус-преобразования Фурье – $U(t)$ и $V(t)$ соответственно (табл. 2). Жирным шрифтом выделены значимые периодичности с вероятностью 68 %.

Полученные результаты позволяют утверждать, что из значимых гармоник для влагосодержания за теплый период года, наибольшей амплитудой обладает квазитрехлетняя гармоника. Расчеты также показали, что в теплый период года в среднем 90–95 % влаги содержится в слое Земля – 700 гПа. Многолетняя изменчивость влагосодержания в тропосфере Причерноморского региона за теплый период года, а также проведенное скользящее сглаживание с учетом 3-летней периодичности свидетельствуют об отсутствии значимого тренда (рис. 1 а). За 40-летний период влагосодержание в атмосфере Причерноморского региона изменялось незначительно (около 9 %).

Для влагопереноса за теплый период года наибольшей амплитудой также обладает квазитрехлетняя гармоника. Динамика влагопереноса в тропосфере Причерноморского региона в теплый период года с учетом проведенного скользящего сглаживания по 3-летней периодичности свидетельствует о том, что за последние 40 лет произошло значительное уменьшение количества переносимой влаги (рис. 1 б).

Таблица 2

Результаты реализации алгоритма исследования временных рядов значений влагосодержания и влагопереноса с помощью преобразования Фурье

i	ω_i	T	A_i	φ_i	$U(t)$	$V(t)$
Влагосодержание						
4	1,113	5,647	2,122	1,526	-2,157	-0,096
5	1,350	4,656	2,129	1,538	-2,082	-0,069
6	1,586	3,961	2,005	1,44	-2,172	-0,286
7	1,823	3,446	1,788	1,332	-1,511	-0,367
8	2,060	3,050	1,969	1,477	-1,842	-0,174
9	2,297	2,735	2,308	1,441	-2,598	-0,339
10	2,534	2,480	2,301	1,529	-2,140	-0,090
Влагоперенос						
i	ω_i	T	A_i	φ_i	$U(t)$	$V(t)$
4	1,113	5,647	16,309	-1,453	-14,59	1,726
5	1,350	4,656	18,951	-1,562	-21,39	0,190
6	1,586	3,961	18,221	1,291	-17,62	-5,06
7	1,823	3,446	16,274	1,355	-14,49	-3,177
8	2,060	3,050	17,570	1,415	-16,90	-2,652
9	2,297	2,735	19,588	-1,409	-20,97	3,420
10	2,534	2,500	19,646	-1,425	-18,56	2,719

Пространственное распределение статистических характеристик влагосодержания тропосферы показало, что максимальные средние значения W_{cp} характерны для станций Одесса (28,73 кг/м²), Бухарест (28,59), и Туапсе (28,71) и формируются потоком с западной составляющей, который характеризует основной перенос влаги в регионе (рис. 2 а). Пространственно-временное распределение влагосодержания в тропосфере Причерноморского региона за теплый период года выявило существование активного переноса – «реку» влаги, простирающуюся с северо-запада на юго-восток региона (рис. 2 а).

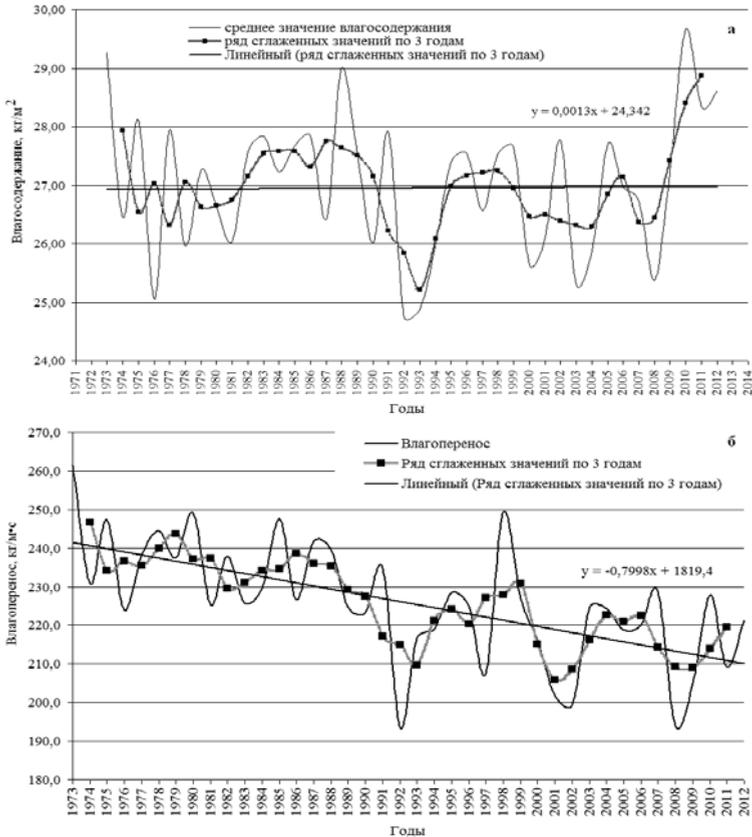


Рис. 1. Многолетняя изменчивость средних значений влагосодержания тропосферы ($\text{кг}/\text{м}^3$) (а) и влагопереноса ($\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$) за теплый период года.

Таким образом, влагосодержание в тропосфере Причерноморского региона в основном определяется крупномасштабными процессами в атмосфере. Черноморский бассейн, безусловно, способствует дополнительному притоку влаги в тропосферу. Об этом свидетельствует абсолютный максимум W_{\max} влагосодержания тропосферы, который наблюдается в районе ст. Туапсе ($45,43 \text{ кг}/\text{м}^3$).

Для анализа количественных характеристик энергетического спектра влагосодержания тропосферы Причерноморского региона были выбраны значения спектральной плотности влагосодержания, которые интерпретированы как годовые, полугодовые и сезонные колебания. Отметим, что максимальные значения спектральной плотности влагосодержания тропосферы, характерные для полугодовых колебаний, выявлены в районе ст. Туапсе (34,95) (рис. 2 в) и для годовых колебаний (55,99) (рис. 2 г). Таким образом, анализ количественных характеристик энергетического спектра влагосодержания показал, что район тропосферы над станцией Туапсе является энергетически активной зоной. При этом пространственное распределение значений спектральной плотности, рассчитанных для сезонных колебаний, над центральной и восточной частью региона носит широтный характер (рис. 2 б).

Однако даже при малых значениях влагосодержания количество влаги, циркулирующей в тропосфере, может достигать больших значений в зависимости от скорости ветра в регионе. В теплый период года значениям влагопереноса присуща значительная изменчивость, в среднем по региону в диапазоне до 100 кг/м·с. Минимальные значения влагопереноса в тропосфере наблюдаются в апреле (156,33 кг/м·с), а максимальные значения – в июле (277,89 кг/м·с). В среднем минимальные значения влагопереноса характерны для ст. Анкара (184,12 кг/м·с), а максимальные – для ст. Дивное (255,56 кг/м·с) и ст. Львов (251,78 кг/м·с) (рис. 3 а).

Анализ значений спектральной плотности влагопереноса, интерпретированных как годовые, полугодовые и сезонные колебания, показал, что максимальные значения спектральной плотности влагопереноса в тропосфере, характерные для годовых колебаний, выявлены над ст. Туапсе (6539,47) и ст. Львов (3879,62) (рис. 3 г).

Для полугодовых колебаний максимум также отмечен над ст. Туапсе (5113,59) и ст. Львов (4555,17) (рис. 3 в). При расчете количественных характеристик энергетического спектра для сезонных колебаний выявлено наличие трех зон максимумов в районе станций Львов (1462,65), Анкара (1160,49) и Туапсе (1063,88) (рис. 3 б). Сезонный максимум в районе ст. Львов обусловлен, по всей видимости, ярко выраженной сезонной динамикой и близостью Карпатских гор.

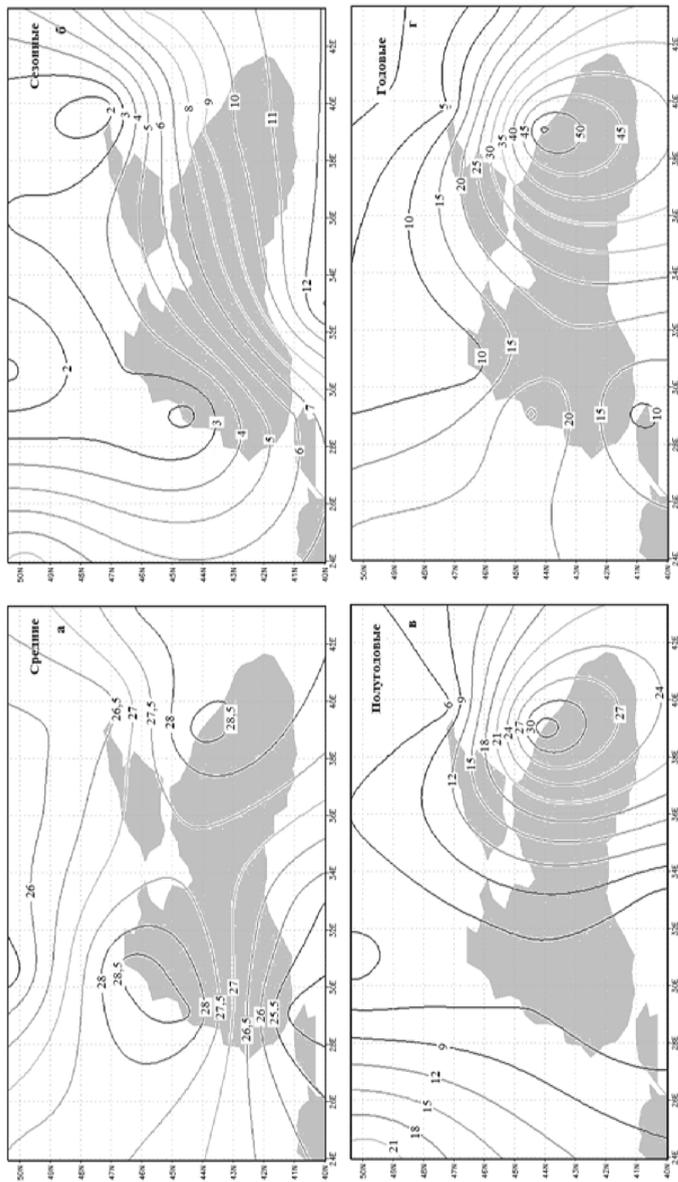


Рис. 2. Средние значения влагосодержания ($\text{кг}/\text{м}^3$) (а), спектральная плотность влагосодержания для сезонных (б), полугодовых (в) и годовых гармоник (Γ) в тропосфере Причерноморского региона.

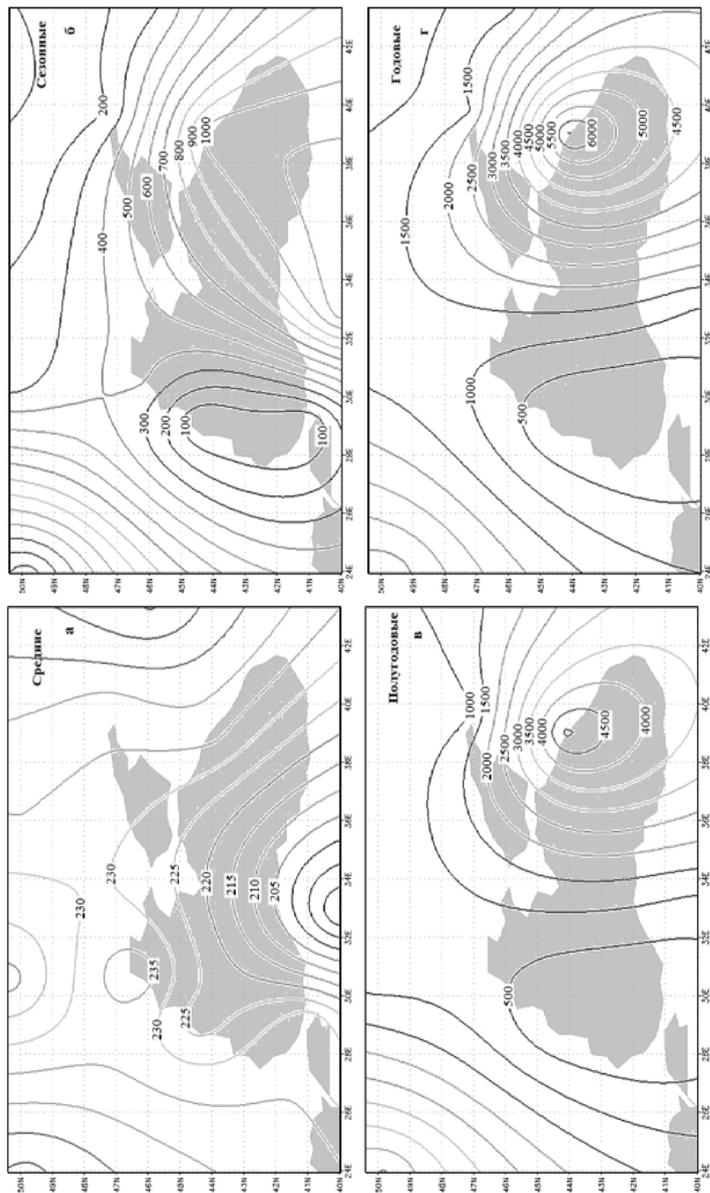


Рис. 3. Средние значения влагопереноса (кг/м·с) (а), спектральная плотность влагопереноса для сезонных (б), полугодовых (в) и годовых гармоник (г) в тропосфере Причерноморского региона.

Условия формирования зон максимума влагосодержания, выявленные на поле средних значений (западная) в районе станций Одесса – Бухарест и (восточная) ст. Туапсе требуют пристального внимания.

Переносчиком влаги в атмосфере в любом агрегатном состоянии является атмосферная циркуляция. В роли основных транспортеров влаги выступают циклоны. Условиям образования и эволюции циклонов на территории Европы посвящено значительное количество работ, в том числе русских ученых Б.И. Срезневского (1881–1883 гг.) [15], М.А. Рыкачева (1896 г.) [14], Б.П. Мультиановского (1915 г.) [13]. В работах Ван-Бембера (1885, 1891 гг.) представлена одна из первых карт траекторий циклонов в Европе [24, 25].

Проанализируем работы, в которых приводятся результаты более длительных исследований. В работе Н.Н. Бельской [3] исследуются условия развития южных циклонов за период 1933–1947 гг. для холодного времени года (октябрь–март) с использованием основных положений гидродинамической теории и адвективно-динамического анализа. Из общего числа проанализированных в работе южных циклонов, перемещающихся на территорию СССР, 48 % возникают на западе Средиземного моря, а 52 % – на западе Черного моря. В работе отмечается, что наибольшую повторяемость (90 %) имеют циклоны, возникающие при меридиональном переносе в тропосфере. Картирование траекторий южных циклонов показало, что пути южных циклонов пролегают по западному и северо-западному побережьям Черного моря. Именно к этому району относится выявленная нами западная зона максимума влагосодержания.

Условия развития и смещения на Европейскую территорию СССР южных циклонов летнего полугодия рассмотрены в работе В.М. Курганской [12]. Автором также выделена группа циклонов, которые выходят на территорию бывшего СССР через Балканский полуостров или с Черного моря, их траектории также пролегают по западному, северо-западному побережью Черного моря в районе выявленной зоны максимума влагосодержания.

В работе Л.Ф. Богатырь [4], посвященной исследованию траекторий циклонов над территорией Украины, исследуется период

с 1945 по 1952 г. Автором показано, что южные циклоны, а в некоторых случаях западные и северо-западные, смещаются по траекториям, пролегающим по западному северо-западному побережью Черного моря.

Траектории циклонов, несущих большое количество осадков на территорию Украины в теплый период года за временной интервал 1981–2000 гг., анализировались в работе В.А. Балабух [2]. Проведенный сравнительный анализ зон циклогенеза в 40–50-е, 80-е и 90-е гг. XX в. выявил повышение активности меридиональной циркуляции в конце столетия, обусловившее увеличение циклогенеза в районе Средиземноморья. Автор показала, что более 80 % циклонов с южной составляющей перемещается по траектории, огибающей Карпаты с востока и пролегающей по западному, северо-западному побережью Черного моря.

Таким образом, первая зона максимальных значений влагосодержания в Причерноморском регионе чаще связана с районом выхода южных циклонов и реже – западных и северо-западных. Причем траектория южных циклонов, пролегающая по западному, северо-западному побережью Черного моря характерна как для холодного, так и для теплого времени года.

Второй максимум в районе станции Туапсе сопряжен с максимальными значениями спектральной плотности влагосодержания и влагопереноса, которые характерны для годовых, полугодовых колебаний.

Существует ряд работ, показывающих, что Средиземноморский регион является зоной самой высокой концентрации зимнего циклогенеза в мире [20, 21]. Некоторые из циклонов настолько интенсивны, что классифицируются как «meteorological bombs» [16, 18]. В [19] показано, что сложные орографические условия и контраст «суша – море» являются определяющими условиями при выделении районов орографического циклогенеза: необходимым условием формирования и развития циклонов является наличие поля деформации в нижних и средних слоях тропосферы со значительными температурными градиентами. В этом смысле не только Средиземное море, но и восточная часть Черного моря также являются зоной сложной орографии. В [22] проводится оценка районов циклогенеза по данным ECMWF re-analysis по сетке

2,25°×2,25° за период 1979–1996 гг. Авторами выделена зона активного циклогенеза в восточной части Черного моря, в которую, безусловно, входит побережье в районе Туапсе. Причем эта зона характеризуется более 70 случаями циклогенеза в августе за исследованный период и остается активной на протяжении всего года [23]. Так, зимний циклогенез активен в восточных районах Черного моря, характеризующихся большими температурными контрастами (суша – море) и находящихся под влиянием горных систем [19].

Заключение

Результаты исследования выявили формирование «реки влаги» центральной части тропосферы Причерноморского региона в теплый период года, образование которой связано с северо-западным направлением воздушных потоков. Максимум влагосодержания над западным побережьем Черного моря совпадает с районом выхода южных циклонов, в редких случаях западных и северо-западных. Траектория южных циклонов, пролегающая по западному, северо-западному побережью Черного моря характерна как для холодного, так и для теплого времени года.

Интерпретация спектральной плотности, рассчитанной для значений влагосодержания и влагопереноса как «энергетического спектра» этих величин, позволила выявить зоны максимальных значений исследуемых параметров в Причерноморском регионе. Максимум средних значений влагосодержания над восточной частью Черного моря сопряжен с максимальными значениями спектральной плотности влагосодержания и влагопереноса. Анализ количественных характеристик энергетического спектра этих величин показал, что район тропосферы над восточной частью Черного моря является энергетически активной зоной, формирование которой обусловлено как орографическими особенностями (перепад высот), так и особенностями циркуляционных процессов в регионе.

Многолетняя динамика влагопереноса в Причерноморском регионе свидетельствует о значительном снижении количества влаги, циркулирующей в регионе. Этот факт косвенным образом

указывает на снижение скорости ветра в исследуемом регионе, однако это предположение требует дополнительных исследований.

Таким образом, распределение средних значений влагосодержания выявляет зоны максимума, а совместный анализ спектральной плотности позволяет интерпретировать выявленные зоны активности в восточной части Черного моря как зоны активного циклогенеза.

Список использованных источников

1. База данных радиозондирования атмосферы. [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu> (дата обращения: 12.03.2013)

2. Балабух В.О. Траекторії циклонів, що зумовлюють небезпечну і стихійну кількість опадів в Україні у теплий період року // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2004. – Вип. 253. – С. 103–119.

3. Бельская Н.Н. Южные циклоны и условия их перемещения на Европейскую территорию СССР // Труды ЦИП. – 1949. – Вып. 17. – С. 64–113.

4. Богатырь Л.Ф. Траектории циклонов на территории Украины // Труды УкрНИГМИ. – 1957. – Вып. 7. – С. 15–49.

5. Бурова Л.П. Влагооборот в атмосфере Арктики. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 154 с.

6. Гончарова Л.Д., Школьний Є.П. Методи обробки та аналізу гідрометеорологічної інформації: Навчальний посібник // Одеса: Екологія. – 2007. – 454 с.

7. Данова Т.Е. Влияние современных климатических изменений на динамику мезомасштабных процессов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Метеорология. Экология. – 2013. – № 3. – С. 79–83.

8. Данова Т.Е., Касаджик Т.Л. Оценка современной изменчивости повторяемости и количества осадков статистическими методами // Научные ведомости БелГУ. Серия Естественные науки. – 2013. – № 7 (160). – Вып. 24. – С. 155–162.

9. Данова Т.Є., Касаджик Т.Л. Сучасні зміни вологовмісту тропосфери в теплий період року в Причорноморському регіоні // Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки». Серія: Географічні науки. – 2013. – № 16 (265). – С. 50–54.

10. Дроздов О.А., Григорьева А.С. Влагооборот в атмосфере. – Л.: Гидрометеоздат, 1963. – 315 с.

11. *Касаджик Т.Л.* Современные изменения влагопереноса в тропосфере Причерноморского региона в теплый период года // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія географія, екологія, геологія. – 2014. – Вып. 40 – С. 81–85.
12. *Курганская В.М.* Условия развития и смещения на Европейскую территорию СССР южных циклонов летнего полугодия // Труды ЦИП. – 1949. – Вып. 16 (43). – С. 3–29.
13. *Мультиановский Б.П.* Влияние центров действия атмосферы на погоду Европейской России в теплое полугодие. Геофизический сборник. – 1915. – № 3. – С. 73–97.
14. *Рыкачев М.А.* Типы путей циклонов в Европе по наблюдениям за 1872–1887 гг. // Записки АН. – 1896. – Т. 3, №3.
15. *Срезневский Б.И.* Пути циклонов в России за 1881–1883 гг. // Метеорологический сборник. – Т. X. – № 9.
16. *Conte M.* The Meteorological bomb in the Mediterranean: a synoptic climatology // WMO/TD № 128. – 1986. – Vol. 4. – P. 17–31.
17. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation // WMO-No. 8. – 2008. – P. 681.
18. *Homar V., Ramis C., Alonso S.* A deep cyclone of African origin in the Western Mediterranean: diagnosis and numerical simulation // Ann. Geophys. – 2002. – Vol. 20. – P. 93–106.
19. *Lionello P., Malanotte-Rizzoli P., Boscolo R.* Mediterranean Climate Variability. – Elsevier Science, 2006 – 421 p.
20. *Pettersen S.* Weather analysis and forecasting. – New York Mac: Graw Hill, 1956.
21. *Radinovic D.* Mediterranean cyclones and their influence on the weather and climate // WMO, PSMP Rep. Ser. – 1987. – No.24.
22. *Trigo I.F., Bigg G.R., & Davies T.D.* Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean // Mon. Wea. Rev. – 2002 – Vol. 130. – P. 549–649.
23. *Trigo I.F., Davies T.D., & Bigg G.R.* Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region // J. Climate. – 1999. – Vol. 12. – P. 1685–1696.
24. *Van Bebber.* Die Zugstrassen der barometrischen minima nach den Bahnen Karten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875–1890 // Meteorol. Zeitschr – 1891.
25. *Van Bebber.* Handbuch der ausübenden Witterungskunde. Bd. 1. – 1885.

Поступила в редакцию 16.02.2016 г.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА SNOW-17 В ПРАКТИКЕ ОПЕРАТИВНОГО ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В РОССИИ

Ю.А. Симонов¹, Э.-Л.Д. Ликарь², Н.Л. Фролова²

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

*²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
simonov@mecom.ru*

Введение

Большинство рек Российской Федерации относится к рекам с преимущественно снеговым питанием (доля талого стока превышает 50 %), причем на 80 % территории нашей страны талые снеговые воды являются основным источником питания, формируя подавляющую часть речного стока. В связи с этим учет процессов динамики снежного покрова крайне важен в задачах оперативной гидрологии, в частности в гидрологическом прогнозировании характеристик речного стока на реках России. Поступление талых вод на поверхность водосбора является основной приходной частью водного баланса водосбора рек нашей страны в период весеннего половодья и оттепелей. Оценка характеристик снежного покрова, их динамики во времени является неотъемлемой компонентой методик и моделей стока рек, используемых в задачах оперативного гидрологического прогнозирования.

Моделированию характеристик снежного покрова посвящено большое количество исследований. Модели и схематизации снежного покрова основаны как на полном описании процесса формирования и разрушения снежного покрова с использованием

уравнений математической физики, так и на концептуальном представлении данных процессов с использованием более простых (эмпирических) соотношений. Структура используемой модели должна быть согласована с наличием исходной гидрометеорологической информации. Например, в настоящий момент использование модели динамики снежного покрова в оперативной практике гидрологического прогнозирования предполагает в основном наличие в качестве исходной фактической и прогностической информации достаточной надежности данных о температуре воздуха и суммах атмосферных осадков. На основе данной информации модель должна воспроизводить основные характеристики снежного покрова и, в конечном счете, искомую для прогностической гидрологии величину – слой поступившей талой воды на поверхность водосбора.

В отечественной оперативной гидрологии в схемах оперативного прогнозирования [1, 2, 6] ежедневных уровней (расходов) воды на реках используются в большей части разработки, представленные в [5, 7, 10, 11]. Формирование талого стока для прогнозов стока горных рек рассмотрено в [4, 9]. Физико-математические модели динамики снежного покрова рассмотрены в [3, 8]. Приведены далеко не все исследования, касающиеся моделирования снежного покрова. Анализ мирового опыта применения различных моделей снежного покрова в практике гидрологического прогнозирования представлен в Руководстве по гидрологической практике [14], а также Руководстве ВМО по прогнозированию паводков [16].

В ходе двустороннего сотрудничества между Росгидрометом и Национальным управлением США по проблемам океана и атмосферы (НУОА) Гидрометцентру России была передана модель динамики снежного покрова SNOW-17, разработанная в Национальной службе погоды США [12, 13]. Данная модель хорошо зарекомендовала себя в практике оперативного гидрологического прогнозирования США, а также других стран. В качестве характеристики для учета теплового обмена между снежным покровом и атмосферой используется температура воздуха. В дополнение к температуре воздуха второй необходимой входной переменной в модель является сумма осадков. Температура воздуха является

переменной, которую достаточно просто измерить. Кроме того, прогнозы температуры воздуха в настоящий момент являются достаточно надежными. Данный параметр хорошо поддается интерполяции, а также экстраполяции в области с отсутствием наблюдений, поскольку он тесно связан с физико-географическими факторами (рельефом, растительностью), что позволяет проводить его оценку на водосборах без наблюдений (например, во многих горных районах). Физически обоснованное описание процессов динамики снежного покрова, с одной стороны, и использование в виде входных данных температуры воздуха и осадков, с другой, позволили модели SNOW-17 стать одной из наиболее распространенных моделей в США с точки зрения ее использования в оперативной гидрологии. Оценка возможности применения данной модели в качестве схемы расчета динамики снежного покрова в методиках прогнозирования стока для российских рек с учетом детальности имеющейся гидрометеорологической информации представляет интерес и легла в основу настоящего исследования.

Модель снежного покрова SNOW-17

В основе модели снежного покрова SNOW-17 заложена концептуальная схематизация процессов динамики снежного покрова. Модель рассчитывает накопление снежного покрова, его уплотнение (рекристаллизацию), таяние, задержание жидкой воды в снеге, перемещение воды в толще снежного покрова и, наконец, отдачу воды из снежного покрова на поверхность водосбора. Указанные процессы описаны в приближенных эмпирических уравнениях, подробная информация о которых представлена в ряде работ авторов модели [12, 13]. На рис. 1 приводятся основные элементы схематизации.

После разделения осадков на жидкие и твердые (по значению температуры воздуха) происходит расчет аккумуляции снежного покрова (в случае выпадения снега), при этом принимается, что плотность свежевыпавшего снега ρ_n зависит от температуры воздуха t_a :

$$\rho_n = 0,05 + 0,0017t_a^{1,5} .$$

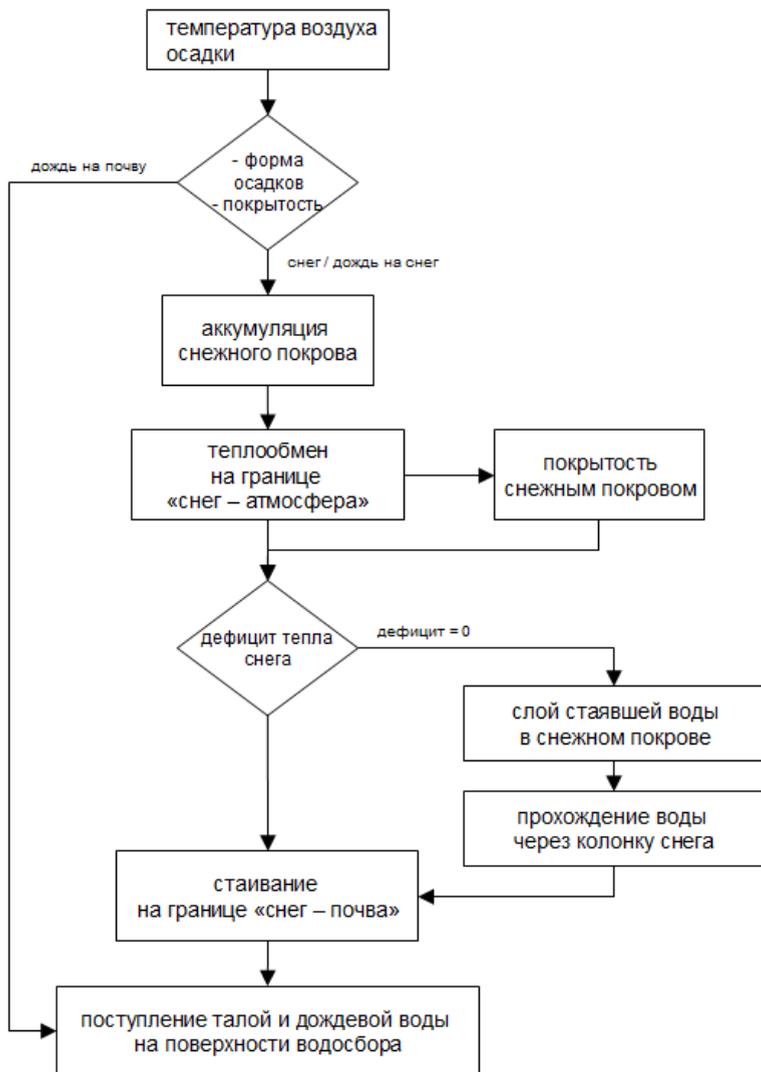


Рис. 1. Последовательность расчета динамики снежного покрова.

После этого производится расчет высоты снежного покрова с использованием значений слоя твердых осадков P_n и плотности снега: $H_n = 0,1 P_n / \rho_n$. Температура свежевывавшего снега T_n принимается равной 0°C или t_a в зависимости от того, какое значение меньше. Если значение T_n меньше 0°C , рассчитывается изменение дефицита тепла снежного покрова ΔD_p , связанного с выпадением твердых осадков:

$$\Delta D_p = -T_n \cdot P_n / L_f c_i,$$

где L_f – скрытая теплота плавления; c_i – удельная теплоемкость льда. Значение ΔD_p показывает количество тепла, которое необходимо сообщить снежному покрову для того, чтобы привести его температуру к 0°C .

Расчет слоя стаявшего снега рассчитывается в двух случаях – при ясной погоде и при выпадении осадков на снежный покров. В случае выпадения дождя на снежный покров решается уравнение теплового баланса в следующей форме:

$$\Delta Q = Q_n + Q_h + Q_e + Q_m + Q_g,$$

где ΔQ – изменение теплосодержания снежного покрова; Q_n – радиационный баланс; Q_h – турбулентный поток тепла; Q_e – поток скрытого тепла (обусловленного испарением и конденсацией); Q_m – поток тепла, приносимый с жидкими осадками; Q_g – теплообмен с почвой. Для его решения в приближенном виде принимаются следующие допущения: коротковолновая радиация пренебрежимо мала (облачная погода), приходящее длинноволновое излучение принимается равным величине излучения «черного тела», высокая относительная влажность (около 90 %). Температура воздуха выступает в качестве индикатора радиационного баланса. При указанных допущениях расчет радиационного баланса в период выпадения осадков сводится к вычислению разницы между длинноволновой приходящей радиацией и величиной радиации,

излучаемой снегом. При расчете потока скрытого тепла используется параметр $UADJ$ (осредненная за расчетный интервал ветровая функция, мм/мб):

$$Q_e = \frac{L_s \rho_w}{10} UADJ \cdot (e_a - e_{sur}) \cdot \Delta t,$$

где L_s – скрытая теплота возгонки, кал/г; ρ_w – плотность воды, г/см³; e_a – упругость водяного пара, мб; e_{sur} – упругость водяного пара у поверхности снежного покрова (состояние насыщения при температуре поверхности снега), мб; Δt – интервал расчета, ч.

Турбулентный теплопоток Q_h выражается через соотношение со скрытым потоком тепла Q_h/Q_e и вычисляется по формуле:

$$Q_h = \frac{L_s \rho_w}{10} \cdot \gamma \cdot UADJ \cdot (t_a - t_{sur}) \cdot \Delta t,$$

где γ – психрометрическая константа; $(t_a - t_{sur})$ – градиент температуры воздуха и поверхности снежного покрова.

Для расчета потока тепла Q_m , связанного с изменением массы снега, рассматривается уравнение водного баланса снега:

$$P - O_s + \Delta t \cdot V + V_g = \Delta W,$$

где P – слой осадков, мм; O_s – сток талой воды из колонки снега, мм; V – перенос водяного пара между снегом и атмосферой, мм; V_g – перенос водяного пара между снегом и почвой, мм; ΔW – изменение водного эквивалента снежного покрова, мм. Сделав предположение о температуре стаявшей воды, равной 0 °С, а также о том, что перенос тепла с обменом водяного пара между снегом и атмосферой и грунтом пренебрежимо мал, связанный с изменением массы снежного покрова поток тепла Q_m связан только с выпадением осадков:

$$Q_m = \frac{c_r \cdot \rho_w \cdot P}{10} t_w,$$

где c_r – удельная теплоемкость осадков; t_w – температура смоченного термометра.

Принимая во внимание указанные соотношения для расчета членов уравнения теплового баланса, слой стаивания M (мм) определяется из соотношения

$$M = 10 \frac{\Delta Q}{L},$$

где L – скрытая теплота плавления (для тающего снега в естественных условиях равна 80 кал/г).

В случае солнечной погоды без осадков для расчета слоя ставшего снега используется зависимость, основанная на связи слоя стаивания a (коэффициента стаивания) с положительной температурой воздуха (или с температурой воздуха T^* , превышающей температуру таяния снежного покрова в данных условиях):

$$M = a \cdot T^* \cdot \tau.$$

Оценке коэффициента стаивания посвящено большое количество исследований [5, 6, 10], в данной схематизации расчет коэффициента производится в зависимости от времени года и соотношения его возможных максимального и минимального значений (параметры $MFMAX$ и $MFMIN$ соответственно).

Схематизация динамики снежного покрова в рамках модели SNOW-17 рассматривает снежный покров в виде одного слоя. В модели производится непрерывный расчет состояния насыщенности талой водой снежного покрова с помощью отслеживания содержания воды в жидкой фазе в снежном покрове, а также дефицита тепла снежного покрова для расчета итоговой отдачи снегом талой воды. Снежный покров считается насыщенным, если он больше не может удерживать дополнительную талую или дождевую воду.

Для каждого расчетного интервала времени модель определяет максимальную водоудерживающую способность снега (с помощью параметра $PLWHC$), содержание жидкой воды (стаявшей за данный интервал времени или поступившей с дождем), а также дефицит тепла снежного покрова [12, 13]. Избыток жидкой воды

в колонке снега E (мм), возникает в том случае, если количество жидкой воды (стаявшей и поступившей с дождем) на поверхности снега Q_w превосходит дефицит тепла снега D , а также его водоудерживающую способность:

$$E = Q_w + W_q - W_{qx} - D - (PLWHC \cdot D).$$

Здесь W_q – количество жидкой воды в снеге; W_{qx} – водоудерживающая емкость снежного покрова. В других случаях происходит смерзание возникшего слоя жидкой воды или его расходование на пополнение водоудерживающей емкости снежного покрова. Искомая характеристика для оперативной гидрологии – величина поступления воды на поверхность водосбора Q_{mr} (мм). Величина поступления жидкой воды на поверхность водосбора рассчитывается с учетом возможного временного задержания воды в колонке снега, основанного на эмпирической зависимости от отношения водного эквивалента снежного покрова к избытку воды в жидком виде W_i/E .

Заключительные расчеты модели относятся к вычислению плотности «старого» снежного покрова отдельно с учетом его уплотнения и метаморфизма [15] для определения средней плотности снежного покрова (с учетом плотности свежеснегавшего снега) и высоты снежного покрова.

Выходными значениями модели снежного покрова SNOW-17 являются суммарный водный эквивалент снежного покрова (включая жидкую и твердую составляющую), высота снежного покрова, а также поступление тало-дождевой воды на поверхность водосбора за расчетный шаг по времени. Именно последняя характеристика представляет наибольший интерес для оперативной гидрологии в качестве входной величины в модели формирования речного стока. Первые две характеристики (особенно первая – высота снега) предоставляют возможность проверки качества работы модели при использовании данных маршрутных снегосъемок или измерений высоты снежного покрова на сети метеорологических станций. Детальное описание модели представлено в [14, 15].

Программная реализация модели

Модель реализована на языке программирования *Fortran* в виде главной программы и набора подпрограмм, отвечающих за расчет каждого из основных блоков модели (см. рис. 1):

- подпрограмма расчета теплового баланса снежного покрова;
- подпрограмма расчета покрытости снежного покрова (доли водосбора, покрытой снегом);
- подпрограмма расчета слоя стаивания;
- подпрограмма расчета плотности снежного покрова;
- подпрограмма расчета прохождения слоя стаявшей воды через колонку снега.

Главная программа отвечает за инициализацию модели для текущего расчетного интервала по времени путем считывания значений переменных состояния модели (рассчитанных на предыдущем расчетном шаге), а также исходных метеорологических данных наблюдений за температурой воздуха и осадками.

Расчетный шаг моделирования выбирается исходя из конкретной задачи. Для учета внутрисуточного колебания температуры воздуха и, соответственно, теплового баланса снежного покрова рекомендуется задавать шаг, равный 6–12 ч, в некоторых случаях допустимо задать расчетный шаг по времени, равный 24 ч. Для расчета программе необходима следующая информация:

- оперативная гидрометеорологическая информация (температура воздуха, сумма осадков);
- параметры модели применительно к рассматриваемому речному водосбору (физико-географические характеристики речного водосбора, например широта местности);
- переменные состояния модели (переменные модельной системы, рассчитанные на предыдущем расчетном шаге по времени).

Модель имеет 12 параметров, большинство из которых имеет четкий физический смысл. В табл. 1 приводятся параметры модели SNOW-17. Значения параметров модели рассчитываются на основе физико-географической и ландшафтной информации о рассматриваемых водосборах (в случае расчета так называемых «априорных» параметров) или методами оптимизации.

Таблица 1

Описание параметров модели SNOW-17

Параметр	Описание параметра	Единица измерения
<i>SCF</i>	поправка на количество измеренных осадков, выпавших в виде снега	–
<i>MFMAX</i>	наибольший коэффициент стаивания	мм/(°С·6ч)
<i>MFMIN</i>	наименьший коэффициент стаивания	мм/(°С·6ч)
<i>UADJ</i>	среднее значение ветровой функции в период выпадения дождя	мм/мб
<i>SI</i>	средний водный эквивалент снега, выше которого водосбор полностью покрыт снегом	мм
<i>ADC</i>	ординаты кривой распределения водного эквивалента снега (WE/A_i)	–
<i>NMF</i>	наибольший отрицательный слой стаивания	мм/(°С·6ч)
<i>TIMP</i>	параметр для расчета дефицита тепла снежного покрова	–
<i>PXTEMP</i>	температура, выше которой осадки выпадают в виде дождя	°С
<i>MBASE</i>	температура таяния снега	°С
<i>PLWHC</i>	водоудерживающая емкость снега	%
<i>DAYGM</i>	слой стаивания на границе «снег – почва» за сутки	мм

Помимо параметров, в качестве входной информации для расчета на каждом временном шаге требуется задание переменных состояния модели. К переменным состоянию относятся характеристики снежного покрова, которые определяют состояние моделируемой системы (в данном случае – снежного покрова) на начало расчетного интервала времени, например водный эквивалент снежного покрова, плотность снега, объем водоудерживающей емкости, дефицит тепла снега и другие переменные (табл. 2).

Таблица 2

Описание переменных состояния модели SNOW-17

Переменная состояния	Описание переменной состояния	Единица измерения
<i>we</i>	запас воды в твердой фазе снежного покрова	мм
<i>neghs</i>	дефицит тепла снежного покрова, выраженный в единицах слоя талой воды	мм
<i>tindex</i>	индекс предшествующей температуры	°С
<i>liqw</i>	количество воды, удерживаемое снежным покровом	мм
<i>accmax</i>	максимальный запас воды, наблюдаемый с начала накопления снежного покрова	мм
<i>sb</i>	запас воды в снежном покрове на момент выпадения осадков	мм
<i>sbaesc</i>	покрытость водосбора снежным покровом на момент выпадения осадков	доли единицы
<i>sbws</i>	запас воды в снежном покрове, выше которого может наблюдаться 100 % покрытость снежным покровом	мм
<i>storge</i>	количество воды, удерживаемой снежным покровом	мм
<i>aeadj</i>	покрытость водосбора снежным покровом	доли единицы
<i>exlag (7)</i>	количество воды, удержанной снежным покровом, за последние 7 расчетных шагов (массив)	мм
<i>sndpt</i>	глубина снежного покрова	см
<i>sntmp</i>	средняя температура снежного покрова	°С
<i>dta</i>	изменение температуры воздуха	°С

Моделирование снежного покрова

При выборе водосбора для решения поставленной цели руководствовались двумя критериями: во-первых, выбрать водосбор с различными физико-географическими и ландшафтными условиями, во-вторых, подобрать места с наибольшим количеством исходных данных для проверки качества моделирования. В качестве тестового был выбран водосбор р. Протва у с. Спас-Загорье. Протва является левым притоком р. Оки с площадью водосбора около 4620 км². Она протекает по территории Московской и Калужской областей. Площадь водосбора р. Протвы у с. Спас-Загорье составляет 3640 км², длина реки – 204 км. Залесенность водосбора составляет около 49 %. В рассматриваемый период (с 1956 по 1985 г.) снегомерные маршруты проводились на полевой и лесной части водосбора в холодную половину года раз в пятидневку. Температура воздуха и осадки за период с 1956 по 1985 г. для данного водосбора были рассчитаны по данным измерений на метеорологических станциях в гг. Можайск и Малоярославец (рис. 2). Расчетный шаг моделирования составил 24 часа.

В качестве проверочных характеристик использовались величины водного эквивалента снежного покрова (ВЭС, мм), а также глубины снежного покрова (см).

Исходные метеорологические данные за период с 1956 по 1985 г. по температуре воздуха и осадкам были подготовлены для ввода в модель SNOW-17. Было выполнено два расчета – для полевой и для лесной частей расчетного водосбора. Отдельно для полевой и отдельно для лесной части водосбора были рассчитаны значения констант и параметров модели применительно к выбранному расчетному водосбору.

Были использованы рекомендуемые значения параметров (априорные параметры) для данной природной зоны [12, 13]. Основное отличие параметров для лесной и полевой частей водосбора касаются значений максимально возможного коэффициента стаивания (параметр *MFMAX*), а также величины среднего водного эквивалента снега, выше которого водосбор полностью покрыт снегом (параметр *SI*). Значения используемых параметров представлены в табл. 3.

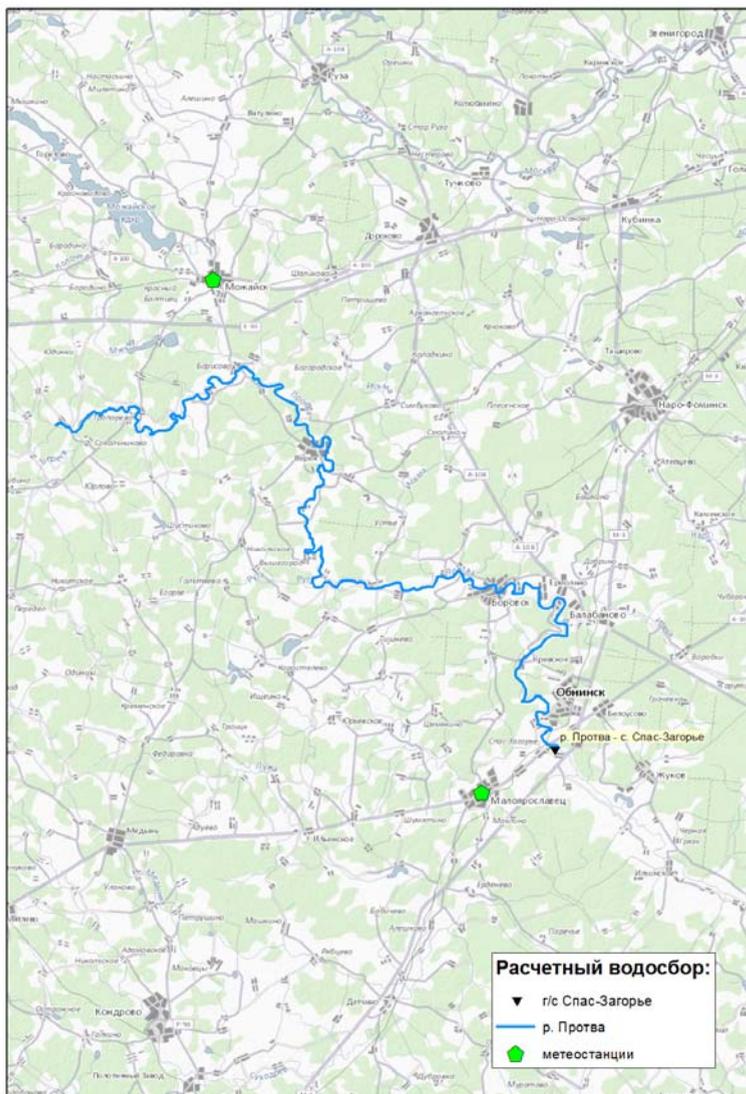


Рис. 2. Расчетный водосбор р. Протва – с. Спас-Загорье (зеленый цвет – лесная часть водосбора, белый цвет – полевая часть водосбора).

Таблица 3

Значения параметров модели SNOW-17 для расчета динамики снежного покрова на водосборе р. Протва – с. Спас-Загорье

Параметр	Поле	Лес
<i>SCF</i>	0,90	0,90
<i>MFMAX</i>	2,50	1,50
<i>MFMIN</i>	2,00	0,50
<i>UADJ</i>	5,00	500
<i>SI</i>	50	500
<i>ADC</i>	0,00	0,00
<i>NMF</i>	2,50	1,50
<i>TIMP</i>	1,00	1,00
<i>PXTEMP</i>	0,25	0,25
<i>MBASE</i>	1,20	1,20
<i>PLWHC</i>	0,15	0,15
<i>DAYGM</i>	0,10	0,10

В результате модельных расчетов были получены многолетние ряды рассчитанных значений ВЭС, высоты и ряда других характеристик снежного покрова отдельно для лесной и полевой частей водосбора р. Протвы. Для оценки качества расчетов характеристик снежного покрова были использованы многолетние данные измерений ВЭС и высоты снежного покрова с 1956 по 1985 г. За критерии качества приняты две величины – среднее квадратическое отклонение (СКО) и квадрат коэффициента корреляции расчетной и измеренной величины R^2 , отражающий тесноту связи между исследуемыми величинами.

На рис. 3, 4 представлены измеренные и рассчитанные величины ВЭС для полевой и лесной частей водосбора соответственно. Значения СКО за весь расчетный период (1956–1985 гг.) для полевой составляющей водосбора составили 14 мм, для лесной – 15 мм.

На рис. 5, 6 представлена связь между рассчитанными и измеренными значениями ВЭС. Величина R^2 для полевой части составила 0,87, для лесной – 0,73.

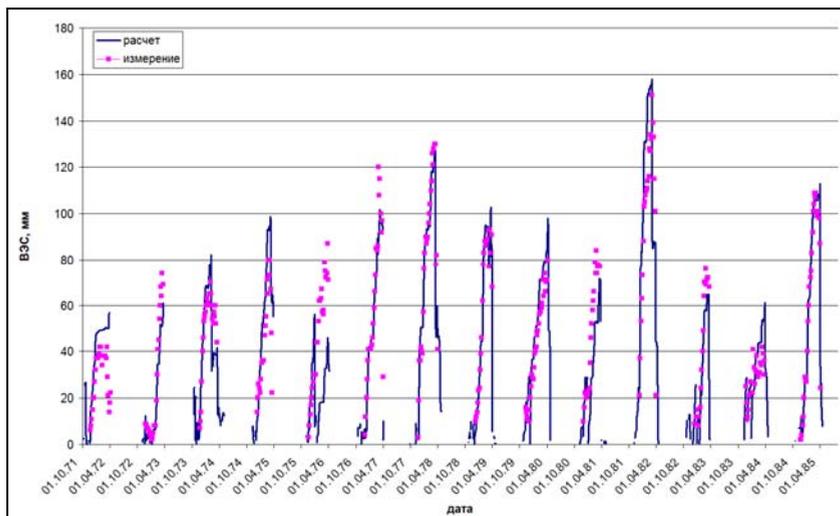


Рис. 3. Модельный расчет ВЭС для полевой части водосбора р. Протва – с. Спас-Загорье.

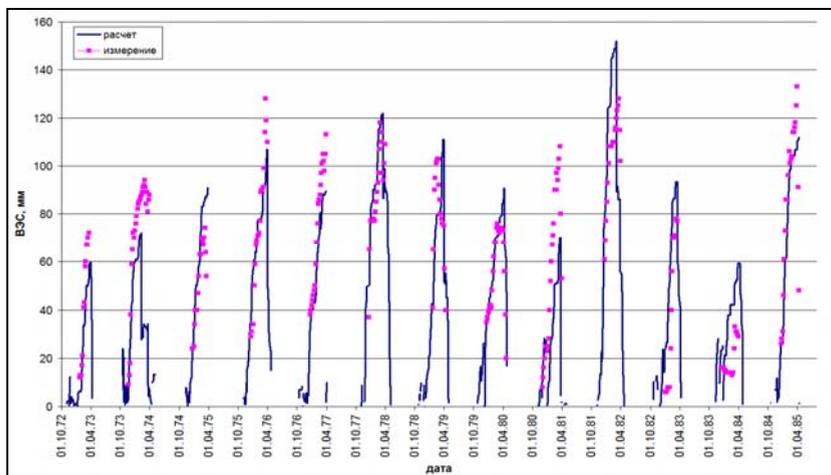


Рис. 4. Модельный расчет ВЭС для лесной части водосбора р. Протва – с. Спас-Загорье.

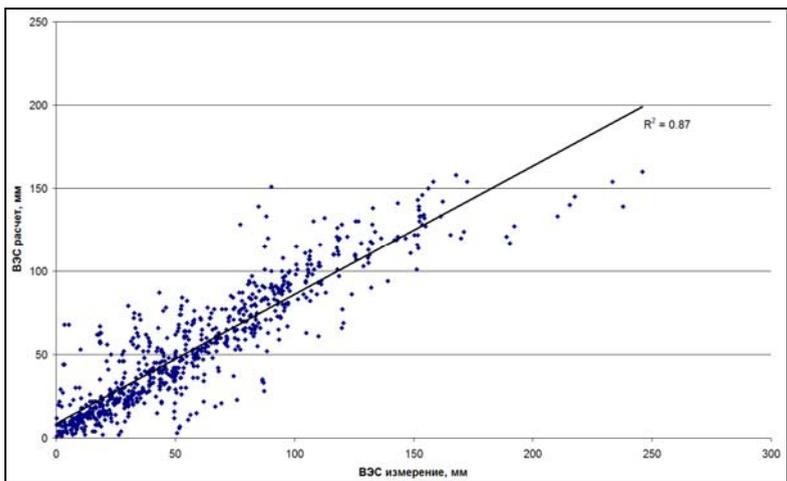


Рис. 5. Модельные и измеренные величины ВЭС для полевой части водосбора р. Протва – с. Спас-Загорье.

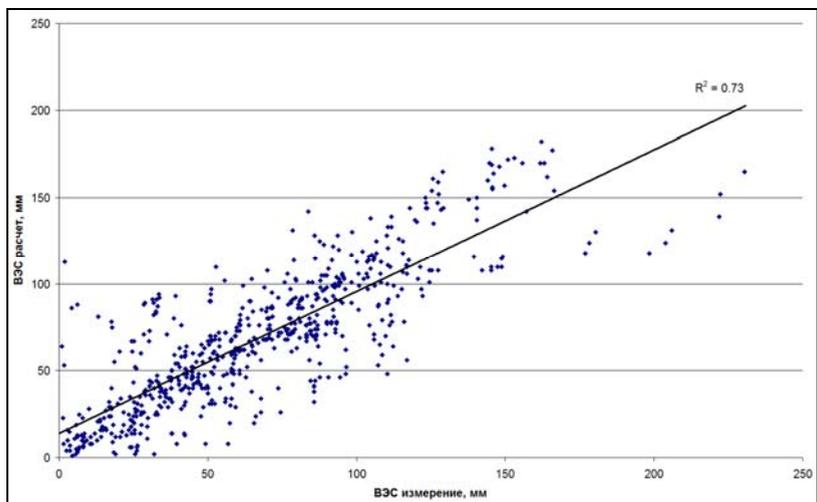


Рис. 6. Модельные и измеренные величины ВЭС для лесной части водосбора р. Протва – с. Спас-Загорье.

Значения СКО расчета высоты снежного покрова для выбранного периода составили для поля и леса одинаковую величину 6 см. Теснота связи между измеренными и рассчитанными значениями превысила значение 0,8: для поля R^2 принял значение 0,88, для леса – 0,81.

Заключение

В проведенном исследовании показана перспективность использования модели динамики снежного покрова SNOW-17 применительно к оперативной гидрологии, в частности в схемах расчета речного стока в задачах гидрологического прогнозирования. В качестве входных метеорологических данных модель использует только температуру воздуха и осадки, что делает ее легко применимой для использования на водосборах с недостаточным уровнем обеспеченности гидрометеорологической информацией. При использовании априорных (рекомендуемых для данного региона) параметров модель показала хорошие результаты расчета основных характеристик снежного покрова. В дальнейшем планируется разработать алгоритмы расчета параметров модели с помощью зависимостей параметров от физико-географических и ландшафтных характеристик речных водосборов, а также с помощью методов оптимизации, что позволит повысить качество моделирования характеристик снежного покрова и начать использовать модель в качестве блока в схематизации расчета речного стока в прогностических задачах.

Список использованных источников

1. Бельчиков В.А., Корень В.И., Нечаева Н.С. Автоматизированные краткосрочные прогнозы расходов и уровней воды для речной системы Северной Двины // Труды Гидрометцентра России. – 1992. – Вып. 324. – С. 3–15.
2. Борщ С. В., Симонов Ю. А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 349. – С. 63–87.
3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: Академия, 2010. – 304 с.

4. *Денисов Ю.М.* Схема расчета гидрографа стока горных рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 104 с.
5. *Комаров В.Д., Макарова Т.Т., Синегуб Е.С.* Расчет гидрографа половодья небольших равнинных рек на основе данных об интенсивности снеготаяния // Труды Гидрометцентра СССР. – 1969. – Вып. 37. – С. 3–30.
6. *Корень В.И.* Математические модели в прогнозах речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 199 с.
7. *Кузьмин П.П.* Процесс таяния снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 345 с.
8. *Кучмент Л.С., Гельфан А.Н.* Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 2. – С. 76–88.
9. *Мухин В.М.* Модели формирования стока горной реки // Труды Гидрометцентра СССР. – 1977. – Вып. 186. – С. 63–70.
10. *Полунин А.Я.* О моделировании процесса поступления воды на водосбор для краткосрочных прогнозов стока // Труды Гидрометцентра СССР. – 1988. – Вып. 295. – С. 69–79.
11. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – М.: Гидрометеиздат, 1963. – 295 с.
12. *Anderson E.A.* A point energy and mass balance model of a snow cover // NOAA Technical Report NWS 19. – 1976. – 50 p.
13. *Anderson E.A.* Snow accumulation and ablation model – SNOW-17 // NOAA Technical Report. – 2006. – 61 p.
14. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168: sixth edition. – 2009. – 302 p.
15. *Koren V., Schaake J., Mitchell K., Duan Q.Y., Chen F., Baker J.M.* A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models // J. Geophys. Res. – 1999. – Vol. 104 (D16). – P. 19-569–19-585.
16. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. – 2011. – 142 p.

Поступила в редакцию 31.05.2016 г.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАУКАСТИНГА ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИИ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО АЭРОНАВИГАЦИОННОГО ПЛАНА (ГАНП)

А.Р. Иванова, Н.П. Шакина

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
ivanova@mescom.ru*

Введение

В настоящее время заблаговременность всего спектра авиационных прогнозов ограничена областью действия краткосрочного прогнозирования, верхняя граница которого, по определению, составляет 72 часа [1]. Прогнозы по маршруту, включающие поля ветра и температуры, выпускаются с заблаговременностью от 6 до 36 ч с интервалом каждые 3 ч. Выпуск карт особых явлений – SW (significant weather), на которых прогнозируются характеристики струйных течений, тропопаузы, зон обледенения, турбулентности, облачности и т. д. производится для больших территорий (сравнимых с площадью полушария) и должен осуществляться каждые 6 ч с заблаговременностью 24 и 30 ч. Период действия прогнозов по району полетной информации в формате GAMET не превышает 6 ч. Что касается ситуации на аэродромах, здесь прогнозы TAF (заблаговременность 9–30 ч, в зоне действия сверхкраткосрочного (2–12 ч) и краткосрочного (12–72 ч) прогнозов) могут быть скорректированы сообщениями типа TREND, время действия которых составляет не более 2 ч с момента выпуска сводки [2]. Таким образом, действие большинства авиационных прогнозов рассчитано на период от нескольких часов до нескольких десятков часов.

При этом временные масштабы явлений в нижней тропосфере, оказывающих влияние на деятельность авиации, часто составляют минуты или десятки минут. Это относится, например, к изменчивости видимости и высоты нижней границы облачности – основным факторам задержки рейсов в аэропортах умеренных широт. Кроме того, многие явления, связанные с конвекцией (например, шквал или нестационарный сдвиг ветра) и представляющие опасность для воздушных судов (ВС), имеют продолжительность, исчисляемую минутами. Прохождение их в районе аэродрома может оказать неблагоприятное и даже катастрофическое воздействие на ВС при взлете и посадке, когда возрастает риск потери устойчивости ВС. Специфика авиационного прогнозирования состоит в том, что у пилота ВС, летящего с огромной скоростью, слишком мало времени на принятие решения для минимизации рисков, поэтому метеорологическая информация о потенциальной опасности должна быть максимально точной в пределах возможно более короткого промежутка времени.

Численное прогнозирование явлений, представляющих интерес для авиации

Оперативные прогнозы погоды, в том числе прогнозы погоды для авиации, базируются на решении систем полных уравнений в моделях численного прогноза погоды. Поскольку эти дифференциальные уравнения являются нелинейными, применяется подход, позволяющий преобразовать их в систему линейных уравнений путем дискретизации в пространстве и времени, а затем решать уже эту алгебраическую систему, связывающую наборы физических параметров атмосферы (температуру, давление, ветер, влажность и т. п.) в специально выбранных точках – узлах вычислительной сетки. Очевидно, что результат прогноза будет зависеть в большой мере от того, насколько точно описано состояние атмосферы в начальный момент времени, т. е. от густоты наблюдательных сетей, данные которых тем или иным образом интерполируются в узлы сетки. Показано, что для адекватного описания одной волны необходимо по меньшей мере 5 узлов сетки. 10 узлов уменьшают ошибку аппроксимации до 6 % [17].

Масштаб явлений в свободной атмосфере (например, горизонтальная протяженность струйных течений) составляет тысячи километров, и для их прогноза вполне достаточно (при условии насыщения наблюдениями) горизонтального разрешения модели порядка сотни километров. В то же время такие черты крупномасштабных объектов, как области максимального ветра в струйных течениях или зоны деформации поля тропопаузы (воронки, стримеры), имеют на порядок меньшие размеры и в этом случае не могут быть адекватно описаны моделью с крупной сеткой [4].

Отметим также, что для прогнозирования движений, в которых горизонтальный масштаб гораздо больше вертикального, вполне успешно применяется квазистатическое приближение (когда вместо уравнения движения по вертикальной оси в предположении, что вертикальные ускорения мало отличаются от нуля, используется основное уравнение статики). Для процессов, которые не могут быть описаны явно, применяются параметризации. С помощью параметризаций описывают, например, конвекцию, или процессы в погранслое.

В отличие от свободной атмосферы, в погранслое явления, оказывающие влияние на полет, взлет и посадку воздушных судов, часто имеют горизонтальные масштабы от десятков метров до десятков километров. Временные масштабы при этом находятся в диапазоне от нескольких минут до нескольких часов. Для воспроизведения таких процессов принципиально не только уменьшение шага в численных моделях прогноза погоды по пространству и по времени, но и изменение физического описания процессов (переход от параметризаций к явному описанию). На малых масштабах необходимо более точное описание вертикальных движений, то есть переход к негидростатическому приближению. Кроме того, некоторые потенциально опасные для авиации явления в погранслое (вихри спутного следа, нестационарный сдвиг ветра и др.) относятся к «подсеточным» объектам (их горизонтальные размеры меньше шага сетки) и не могут быть явно воспроизведены численной моделью.

Таким образом, успешность модельного прогнозирования явлений и процессов, представляющих интерес для авиации,

усложнена рядом факторов. К ним относятся точность и покрытие доступной системой наблюдений, а также описание процессов в модели и размер шага сетки, определяющий, насколько аккуратно модель может воспроизводить физические и динамические процессы.

Сравнительно недавно модели численного прогноза погоды (ЧПП) начали воспроизводить в явном виде такой важный процесс, как конвекция. Это стало возможным благодаря появлению моделей для ограниченных территорий, использующих сетку с шагом, не превышающим 1 км. Очевидно, что плотность наблюдений для таких территорий должна быть очень высока. Это касается как пространственного масштаба, так и частоты наблюдений. Последняя делает актуальным вопрос непрерывного усвоения данных моделью. Хотя сегодняшние вычислительные возможности неуклонно возрастают с каждым годом, цикл полного оперативного обновления данных пока еще ограничен часами, в то время как конвективные феномены и другие локальные явления живут десятки минут. Таким образом, модельный прогноз погоды недостаточен для адекватного воспроизведения некоторых локальных явлений (например, шквалов) и пока еще часто ограничивается их общим описанием на региональном масштабе.

Понятие наукастинга

Описание изменчивости процессов на коротких интервалах времени обуславливает необходимость перехода к технологии **наукастинга**, требующей непрерывных измерений с большой плотностью.

Термин «наукастинг» (nowcasting), введенный в середине 70-х К.А. Браунингом, воплотил широкий спектр методов интенсивных наблюдений, развитых для целей прогноза погоды на несколько часов. Эти методы связаны с быстрой переработкой (процессингом) наборов данных высокого разрешения, получаемых различными измерительными средствами (главным образом радарными и спутниковыми). Эволюция наукастинга как ветви оперативной метеорологии была тесно переплетена с послевоенными достижениями в дистанционном зондировании, телесвязи и компьютерных

технологиях. Более подробную информацию об этом можно найти в обширном обзоре Клайва Пирса с соавторами [12].

В настоящее время наукастинг («прогноз текущей погоды» в русском переводе, согласно Наставлению ВМО [1]) представляет собой прогноз с заблаговременностью от нескольких минут до нескольких, как правило не более 6 часов. Например, в классификации сроков метеорологических прогнозов Росгидромета, основанной на Наставлении по глобальной системе обработки данных [1], верхняя граница заблаговременности наукастинга составляет 2 ч, в прогнозе осадков, основанном на радарной информации, – 3 ч, во многих метеослужбах мира придерживаются границы, установленной Браунингом, – 6 ч. Часто при прогнозировании какого-либо явления перекрываются границы наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза (до 12 ч). Прогнозы на временных масштабах наукастинга носят название наукастов (по аналогии с forecast – прогноз вперед, nowcast – прогноз на текущий момент).

С 60-х гг. прошлого века в ряде регионов стали доступными в реальном близком времени данные наблюдение радаров и спутников. Первые попытки использования этих данных для прогноза на короткие сроки с помощью экстраполяции изображений касались полос осадков. Было установлено, что объекты больших размеров живут дольше, чем маленькие (время жизни последних – до нескольких десятков минут). Эти ключевые находки согласовывались с ранними исследованиями мультимасштабных свойств атмосферы и связанных с ними ограничений атмосферной предсказуемости [12].

Термин «наукастинг» характеризует не только определенные интервалы заблаговременности, но и, прежде всего, информационную основу и техническую реализацию прогнозирования. Это предполагает использование мощной вычислительной техники, позволяющей реализовать численный прогноз по одной или нескольким негидростатическим моделям, а также обязательное наличие большого объема исходных данных наблюдений и развитой системы их передачи и усвоения.

В настоящее время реализация прогнозов на очень короткие сроки базируется на широком спектре информации наземной,

радарной, спутниковой систем наблюдения. Это автоматические станции погоды, которые передают сведения о давлении, температуре, влажности скорости и направлении ветра (с осреднением от нескольких секунд до нескольких минут), радарные измерения. Кроме этого, реализация включает в себя технологическую организацию непрерывных потоков данных, усвоение этих данных численными моделями с высоким горизонтальным разрешением (порядка километра). Для этого необходимо наличие больших вычислительных мощностей, так как речь идет о непрерывном усвоении огромных потоков информации. Например, геостационарные спутники имеют горизонтальное и временное разрешение порядка нескольких километров и нескольких минут соответственно. Спутниковые измерения могут поставлять данные о радиации, о восстановленных профилях температуры и влажности, о скорости ведущего потока в тропосфере (так называемый «облачный ветер») и других характеристиках. Современные метеорологические радиолокаторы имеют радиус обзора 250–300 км и позволяют осуществлять циклические наблюдения с периодичностью от 3 до 15 мин в круглосуточном автоматизированном режиме, предоставляя данные об облачности, осадках, радиальном ветре с высоким пространственным разрешением (0,5–1,0 км) на площади до 200 тыс. км² [3].

Помимо сетевых приборов, осуществляющих непрерывную регистрацию параметров атмосферы а автоматическом режиме, информацию получают от специально установленных несетевых средств дистанционного зондирования – температурных и ветровых профиломеров, лидаров и т. д. Данные приборов, производящих непрерывные измерения, как правило, подвергаются осреднению (от нескольких секунд до 10 минут). Так, непрерывный волновой лидар ПЛВ-2000 каждые 4 с обновляет информацию о скорости и направлении ветра в диапазоне высот от 10 м до 2 км. Пространственное разрешение данных измерений по вертикали с помощью подобных приборов находится в диапазоне от нескольких метров до нескольких десятков метров. Например, температурный профиломер МТП-5 проводит измерения температуры в вертикальном направлении до высоты примерно 1000 м с разрешением примерно 50 м.

Реализация усвоения всей вышеописанной информации – сама по себе очень непростая наукоемкая задача. Она усложняется еще и тем, что на масштабах наукастинга данные измерений должны усваиваться практически непрерывно. В настоящее время для этой цели применяют техники «квазинепрерывного» усвоения типа наджинга или ансамблевого фильтра Калмана.

В качестве одной из оперативно используемых подобных систем упомянем систему быстрого обновления (Rapid Refresh, RAP). Это оперативная система ежечасной ассимиляции/моделирования, принятая в Национальных центрах прогноза окружающей среды (NCEP), США. Она состоит главным образом из модели ЧПП с шагом 13 км (инсталлированной над территорией Северной Америки) и системы анализа/ассимиляции для инициализации этой модели. RAP дополняется моделью с более высоким разрешением (3 км) и быстрым обновлением (High-Resolution Rapid Refresh, HRRR). В ней обновление данных происходит также ежечасно, но покрывает она меньшую область [19]. Система RAP развита для обеспечения пользователей, которым необходимы сверхкраткосрочные прогнозы погоды с возможностью быстрой корректировки, например для авиации (рис. 1).

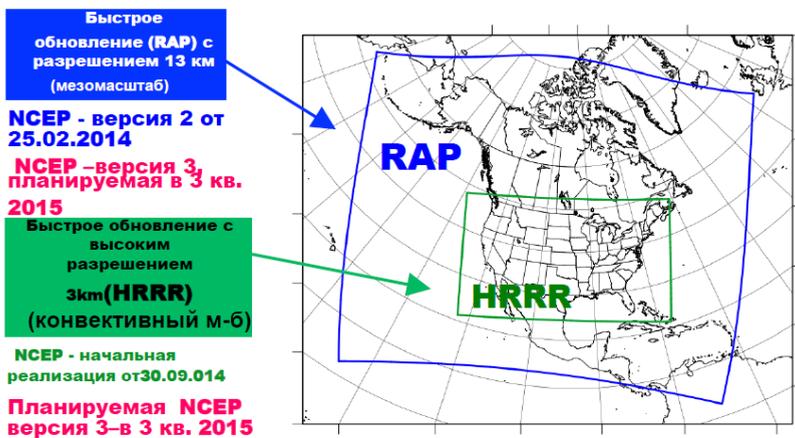


Рис. 1. Области действия моделей быстрого обновления, используемых для генерации авиационных прогнозов в США.

Некоторые современные системы наукастинга для авиации

К предиктантам методов авиационного наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза погоды относятся, прежде всего, те характеристики погоды, которые наиболее сильно влияют на безопасность взлета, посадки и полета ВС – явления, связанные с мощной (грозовой) конвекцией (гроза, град, ливни, шквал, порывы ветра), те явления, что понижают видимость до значений ниже категориальных минимумов (осадки, туман и т. п.). Кроме того, для авиации актуальной является информации об изменении высоты нижней границы сплошной облачности, времени перехода температуры через 0 °С, периодах значительных скоростей и порывов ветра и т. п.

Исходя из особенностей предиктантов, часто системы наукастинга бывают локальными, т. е. предназначенными для прогнозирования одного опасного явления (например, сдвига ветра) или неблагоприятной погоды в конкретный сезон (условия «зимней погоды») [13], либо универсальными, дающими информацию о любых неблагоприятных явлениях в любое время года [10].

Применяемые в мировой практике методы сверхкраткосрочного прогноза и наукастинга преимущественно основаны на статистической обработке рядов данных о предикторах (в качестве которых используются измерения с дискретностью 10–30 мин на аэродроме и на достаточно большом числе окрестных станций, а также модельные прогностические величины и данные дистанционных измерений, прежде всего с помощью радаров и спутников) и о предиктантах, охарактеризованных выше. Разработка таких методов производится как в крупных метеорологических центрах, так и в подразделениях, непосредственно занятых обеспечением авиации, в том числе на международных аэродромах с интенсивным воздушным движением.

Рассмотрим особенности построения методов, систем и технологий сверхкраткосрочного прогноза и наукастинга на конкретных примерах из мировой практики обеспечения авиации. Пионерами в авиационном наукастинге являются США и Канада. Прогнозирование неблагоприятных условий зимней погоды, начиналось

с таких систем, как канадская AVISA (прогнозирование осадков и обледенения в районе аэродрома) и разработанная в США система WSDDM (Weather Support to Deicing Decision Making). В настоящее время в 46 аэропортах Канады функционирует система универсального наукастинга CAN-Now. Исходными данными для прогноза на 1–6 ч являются наземные наблюдения автоматических станций, численные прогнозы, данные радаров, радиометров и спутников. В числе предиктантов – осадки в виде снега, дождя и гололеда, метель, обледенение в облаках, большие скорости ветра и его порывов, сдвиги ветра, турбулентность, низкая облачность, плохая видимость и туман, в теплое время – наличие конвективной облачности и грозная деятельность [10].

В данной системе применяется так называемая методика адаптивного смешивания данных моделей и наблюдений (ABOM – Adaptive Blending of Observations and Models). Суть ее состоит в следующем. Прогностическое значение для каждого параметра определяется как коррекция текущего значения с использованием тренда. В свою очередь, тренд складывается из двух составляющих: первая – тенденция изменения прогностической величины, полученная по наблюдениям, вторая – тенденция как результат численного прогноза локальной или региональной модели, использующая интегрированную систему с весами (INTW – integrated weighting system). Каждая из двух составляющих входит в уравнение со своим весом, определяемым интегрированной системой INTW (integrated weighting system) по данным предыдущего прогноза (полученного часом ранее) и обновляемым каждые 15 мин. Результатом наукастинга служат «карты ситуаций», выпускаемые с периодичностью 15 мин. Пример для аэропорта Торонто им. Лесли Пирсона (CYYZ) представлен на рис. 2. Здесь в цветовой шкале, обозначающей степень опасности ситуаций (от зеленого – «безопасно» до красного – «очень опасно») дается (сверху вниз) информация о ветре на трех взлетно-посадочных полосах, видимости, нижней границе облачности, сдвиге ветра/турбулентности, осадках, грозах/молниях, обледенении.

В аэропорту Мюнхен недавно начала работать система автоматического наукастинга WHITE (Winter Hazards In Terminal

Environment – зимние опасные явления погоды в окрестности аэропорта). Предикторами ее являются момент появления, продолжительность и тип осадков, обледенение ВПП, обледенение самолетов на земле, морозный туман и видимость. Автоматическая система ассимилирует данные из различных источников – это 280 автоматических станций вокруг аэропорта, производящих измерения каждые 15 мин, композитные радарные данные, доступные каждые 5 мин, и выходные данные мезомасштабной численной модели COSMO-DE с разрешением 2,8 км (к моменту написания статьи уже 2,2 км).

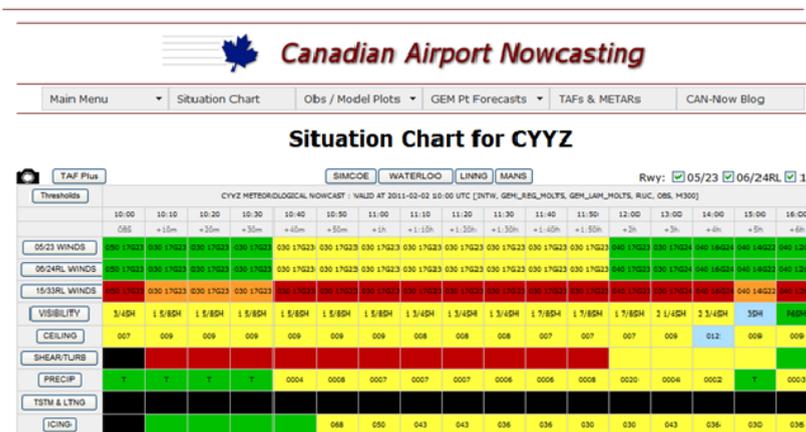


Рис. 2. Пример продукции наукастинга для аэропорта им. Лестера Б. Пирсона (Торонто) [11].

Дальнейшее развитие системы наукастинга предусматривает интеграцию данных самолетных наблюдений AMDAR, использование локальной модели COSMO-MUC, а также спутниковых данных METEOSAT второго поколения. Разработчики системы собираются привлечь модельные ансамблевые прогнозы для улучшения поля первого приближения и реализовать систему верификации наукастов, действующую в реальном времени [11].

Разработанная в США прогностическая локальная авиационная система LAMP (Localized Aviation MOS System) предназначена

для прогнозирования комплекса метеорологических величин и явлений, включая высоту нижней границы облаков и горизонтальную дальность видимости, с заблаговременностью от 1 до 25 ч через каждый час. Предиктанты – для наличия и типа осадков, балла и высот нижней границы облачности, наличия гроз, температуры, точки росы, направления и скорости ветра, для которых прогнозы выдаются в альтернативной и вероятностной форме. В качестве исходных данных используются наблюдения на 1591 станциях на территории США (сюда входят синоптические и аэродромные наблюдения, а также данные сети грозопеленгаторов), композитная радарная информация, климатические характеристики и выходная продукция моделей ЧПП. Прогноз основан на уравнениях множественной линейной регрессии, полученных как для каждой станции (для прогноза температуры, точки росы, скорости и направления ветра), так и для группы станций со сходными физико-географическим условиями (для прогноза редких явлений, таких как облачность с нижней границей ниже 120 м или видимость < 0,5 мили). Передача прогностической информации осуществляется в альтернативной или вероятностной форме [15].

В умеренных широтах с наибольшим воздушным трафиком основными неблагоприятными факторами, влияющими на регулярность и безопасность полетов, в холодный сезон являются низкая облачность и плохая видимость, в теплый сезон – явления, связанные с конвекцией. Для прогноза последней в конкретных районах используются, помимо перечисленных выше, локальные системы наукастинга. К ним относится, например, система ANC (Auto-NowCast), используемая в NCAR для прогноза зарождения, роста и развития опасных конвективных явлений с заблаговременностью 2 ч через 15 мин. Система использует данные сети доплеровских радаров, спутниковую информацию и численные прогнозы погоды. В качестве другого примера наукастинга конвекции можно привести технологию AROME-NWC, используемую в Meteo-France и основанную на объектно-ориентированном подходе. Для каждого индивидуального конвективного очага указывается время и координаты возникновения, отражаемость (по радарным данным), скорость и направление его перемещения, текущая

интенсивность осадков. Обновление данных происходит каждые 10 мин. Горизонтальное разрешение модели AROME в системах наукастинга может достигать 500 м [7].

В отличие от умеренных широт, для обслуживания авиации в тропиках следует учитывать возможность развития неблагоприятных явлений, связанных с конвекцией в течение всего года. Для этого используется, например, разработанная в Гонконге [23] система SWIRLS (Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems – краткосрочное предупреждение интенсивных ливней в локализованных системах), основанная преимущественно на радарных данных, на технике экстраполяции радарного эха. Система ATLAS (Aviation Thunderstorm And Lightning Alerting System) предназначена для предупреждения авиации о грозах и электрических разрядах, так же как и автоматическая система оповещения о грозах ATSAS – Automated ThunderStorm Alerting Service. В основе технологий наукастинга для прогноза конвективных явлений чаще всего лежит использование спутниковой и радарной информации с применением алгоритмов, таких как RDT (Rapidly Developing Thunderstorms), MASCOTTE (Maximum Spatial Correlation Tracking Technique); ForTraCC (Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters) и др. [16].

Обычной практикой в системах наукастинга является формулировка вероятностных прогнозов, где в качестве предикторов привлекаются ансамблевые численные прогнозы. Это достигается с помощью ансамбля моделей и/или вариантов одной и той же модели, отличающихся либо слегка измененными начальными условиями, либо другими характеристиками. Каждый член ансамбля (количество их обычно составляет несколько десятков) производит прогностические поля, в которых имеются различия. Повторяемость в пределах ансамбля различных градаций какого-либо явления затем интерпретируется как оценка вероятности возникновения этих градаций в реальных условиях.

При наличии достаточных вычислительных ресурсов и необходимой исходной информации технология наукастинга с помощью ансамблевого прогнозирования разрабатывается для конкретных аэродромов. Такая система, например, развита для аэропорта

Шарль де Голль (Париж, Франция) с целью прогнозирования эпизодов понижения высоты нижней границы облачности ниже 60 м и видимости менее 600 м с заблаговременностью 0–12 ч [7].

Среди других систем наукастинга особняком стоят системы предупреждения вихрей спутного следа. Это особый вид техногенной турбулентности, негативно влияющий на авиационную безопасность, особенно при взлете и посадке воздушных судов. В настоящее время многие крупные аэропорты стремятся установить системы вихревой безопасности, позволяющие ослабить негативное воздействие вихрей спутного следа. Эти системы состоят, в принципе, из двух основных узлов: средств наблюдений за возникновением спутных вихрей, ASOS (обычно это импульсные или когерентные доплеровские лидары, которые позволяют определять размеры и интенсивность вихрей, их смещение относительно ВПП, положение относительно земной поверхности) и технологии наукастинга ветра и температурной стратификации, позволяющей определять траектории смещения и продолжительность существования таких вихрей.

Приведем в качестве примера систему смягчения влияния вихревой турбулентности в зоне взлета ВС (WTMD), действующую в аэропорту Сан-Франциско [14]. Алгоритм прогнозирования ветра рассчитывает период, когда боковой ветер на взлетно-посадочной полосе (рис. 3, сверху) и до высоты 500 м (рис. 3, внизу) будет обеспечивать условия минимального влияния спутного следа от взлетевшего самолета на судно, следующее за ним. Шкала вихревой опасности в верхней части рисунка, красным цветом отмечен «опасный» интервал времени.

Прогноз приземного ветра в данной системе рассчитывается на основе статистического анализа наблюдений за ветром в течение последних 35 мин (данные автоматических станций наземного наблюдения, оснащенных акустическими анемометрами, с интервалом 1 мин). Прогноз ветра на уровнях до 500 м извлекается из цикла быстрого обновления прогностической модели NCEP.

Еще один пример системы вихревой безопасности – прогностическая система P2P, модель прогноза и переноса вихрей спутного следа, работающая в аэропорту Франкфурт в режиме

реального времени. Она использует иерархию моделей ЧПП внутри системы NOWVIV (NOWcasting Wake Vortex Impact Variables), которая работает с данными акустических анемометров и содара/радиоакустической звуковой системы (SODAR/RASS) [8].

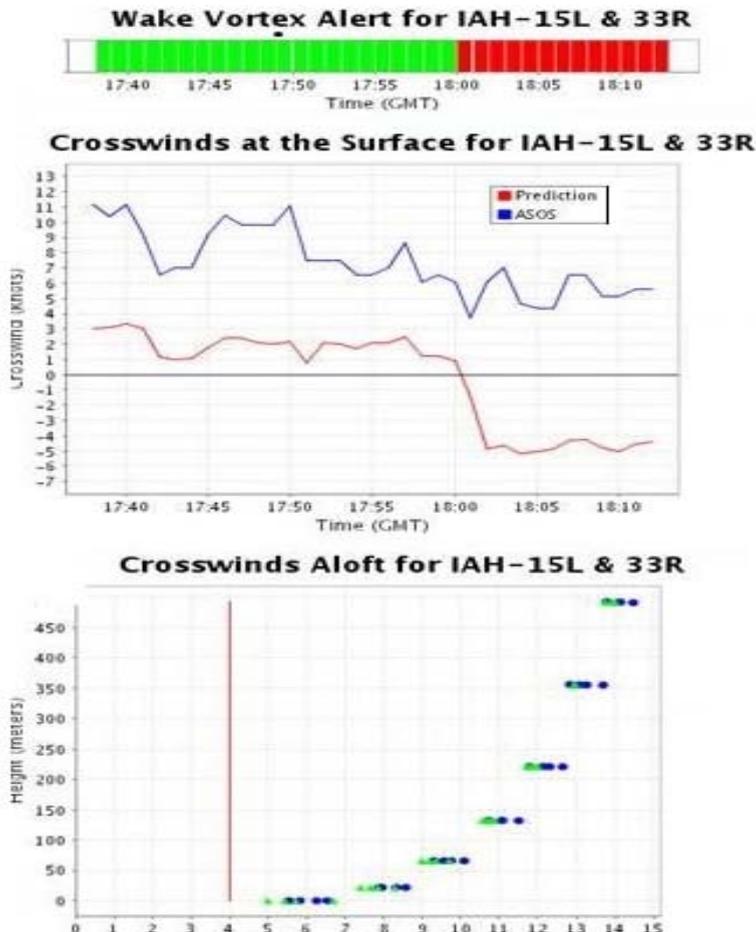


Рис. 3. Выходная продукция системы наукастинга WMTD в аэропорту Сан-Франциско.

Таким образом, в мире существует довольно много прогностических систем наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза для авиации. Для комплексации различных видов информации применяется различный математический аппарат (экстраполяция, блендинг, построение ансамблей, нечеткая логика) [18]. Важнейшими принципами построения технологий авиационного наукастинга остаются использование данных густой сети наземных станций и комбинирование различных видов наблюдений с численным прогнозом погоды.

Перспективы развития наукастинга для авиации в рамках Глобального аэронавигационного плана

Реализация Глобального аэронавигационного плана (ГАНП) подразумевает поэтапную модернизацию всей аэронавигационной системы до 2028 г. [9]. Одним из компонентов этой системы является улучшение и расширение метеорологической информации для аэронавигационного обеспечения. Ключевой концепцией методологии ASBU – авиационной системы блочной модернизации – являются так называемые «операции, основанные на траекториях», подразумевающие быструю интеграцию прогнозов с высоким разрешением и продукции технологии наукастинга в систему организации воздушного движения (ОрВД).

Если до сих пор метеорологические полномочные органы занимаются только сбором и передачей информации, то в будущем конечным продуктом станет преобразование этой информации в компоненты влияния на ОрВД. К 2028 г. система должна прогнозировать особые для авиации явления в пределах 20-минутного интервала.

Для подготовки и апробации возможных путей реализации задач ГАНП, в 2014 г. совместно Комиссией по атмосферным наукам и Комиссией по авиационной метеорологии ВМО было объявлено об организации исследовательского демонстрационного проекта для авиации (AvRDP – Aviation Research Development Project). Инициатива проекта была поддержана Всемирной программой исследования погоды, рабочей группой по изучению наукастинга и рабочей группой по мезомасштабному прогнозированию.

К ключевым целям этого проекта относятся:

- демонстрация текущих достижений техник наукастинга и мезомасштабного моделирования для концепции «операций, основанных на траекториях»;

- определение отвечающих требованиям ASBU методов наукастинга (детерминистских и вероятностных), мезомасштабного моделирования и их верификации;

- перевод метеоинформации в «продукт влияния» в системе ОрВД.

Для реализации этих задач предусматривают развитие технологий наукастинга в следующих направлениях:

- анализ систем погоды, интегрированный для воздушных коридоров (CIWS – corridor integrated weather system), позволяющий точно прогнозировать время прибытия многочисленных ВС в аэропорты с высоким трафиком;

- формулировка почасовых предупреждений о различных особых явлениях с использованием цветовой шкалы опасности для каждого аэропорта;

- почасовой прогноз особых явлений и их комплексирование для территорий одного или нескольких государств;

- объектно-ориентированный наукастинг (в основном связанный с конвективными объектами) с указанием времени их зарождения, направления движения, количества осадков, радиолокационных характеристик (средних и максимальных) и т. д.;

- применение технологии блендинга (смешивания наблюдений и прогнозов) для прогнозирования сверхкраткосрочных изменений некоторых характеристик (видимости, низкой облачности и др.).

Проект AvRDP организуется в аэропортах различных климатических зон, чтобы охватить весь спектр неблагоприятных явлений. Требования к аэропортам таковы: они должны иметь высокую пропускную способность и обеспечивать высокую плотность метеонаблюдений, включающих данные современных систем дистанционного зондирования и самолетные данные. Кроме того, необходима возможность реализации численного моделирования с высоким разрешением.

На первом этапе об участии в проекте объявили пять международных аэропортов (табл. 1). Это аэропорты Шарль де Голль (CDG, Париж, Франция), им. О.Р. Тамбо (JNB, Йоханесбург, Южно-Африканская республика), им. Лестера Б. Пирсона (YYZ, Торонто, Канада), а также китайские аэропорты Хунцяо (SHA, Шанхай) и Чхеплакок (HKG, Гонконг). По данным за 2013 и 2014 гг. количество взлетно-посадочных операций (ВПО) в аэропортах Парижа, Гонконга и Торонто превышало 1000 в сутки, в аэропорту Йоханесбурга это число превысило 550, в аэропорту Шанхая – 300.

Таблица 1

Особенности климатических режимов и предиктанты наукастинга в аэропортах – участниках AvRDP

Аэропорт	Особенности климатического режима	Элементы наукастинга
CDG	Умеренный климат Северного полушария, расположен внутри континента	Зимняя погода: снегопад, обледенение, низкие температуры. Туман
HKG	Субтропический климат, аэропорт окружен водой и расположен близко к горам	Конвекция и грозы. Низкая видимость и облачность
JNB	Субтропический климат Южного полушария, внутри континента	Конвекция. Туман
SHA	На границе субтропических и умеренных широт, расположен внутри материка, но недалеко от дельты реки Янцзы и побережья Восточно-Китайского моря.	Конвекция
YYZ	Средние широты, расположен внутри материка, но недалеко от озера Онтарио	Зимняя погода: снегопад, обледенение, низкие температуры, тип и кол-во осадков. Скорость и направление ветра, сдвиг ветра и порывы. Турбулентность. Низкая облачность

Информационные и технологические возможности этих аэропортов представлены в табл. 2.

Данные аэропорты уже имеют опыт прогнозирования текущей погоды и используют системы наукастинга, такие как NWC-SAF (Йоханесбург, Париж) [20], CAN-NOW (Торонто), INCA-CE (Париж), WINDS (Шанхай), ATSAS (Йоханесбург) [21], SWIRLS и ATLAS (Гонконг) [22].

Большинство из этих систем предназначены для наукастинга опасных конвективных явлений. Это упомянутые выше системы SWIRL, ATLAS, ATSAS, а также ASPOC (Application de Signalisation et de Prévision des Orages pour la Circulation aérienne) – приложение об оповещении и прогнозе гроз для воздушного движения.

Таблица 2

Информационная и научная база аэропортов – участников AvPDP

Аэропорт	Наблюдения								Системы наукастинга и модели			Данные ОрВД				
	МРЛ или ДМРЛ	Геостационарный спутник	Ветровой профайлер	Лидар	Анеометры	Датчик видимости	Данные AMDAR	Другие наблюдения	Система наукастинга	Микро/мезомасштабная модель ЧПП	Региональная модель ЧПП	Сообщения пилотов (PIREP)	Данные о ВС	Данные о пропускной способности	Данные о воздушном сообщении	Прочее (напр., система АЗН-В)
CDG	+	+			+	+	+	+	+	+						
HKG	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SHA	+	+	+		+	+	+		+	+	+	+	+	+		
JNB	+	+				+					+	+				
YYZ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+					

В отличие от них, INCA – Integrated Nowcasting for Comprehensive Analysis (Австрия) – система наукастинга, прогнозирующая, кроме общих метеорологических параметров (температура, скорость ветра, влажность, давление), важные для авиации характеристики: потенциал обледенения, видимость, порывы ветра. Система наукастинга NWC-SAF использует преимущественно спутниковую информацию (Satellite Application Facility).

В ходе стартового совещания по проекту AvRDP к вышеупомянутым участникам был добавлен еще один канадский аэропорт – Икалуит (YFB), эксплуатирующий описанную ранее систему наукастинга CAN-Now. Икалуит не является международным аэропортом с высокой загруженностью, однако представляет интерес с точки зрения крайне сложных условий погоды арктического типа, характеризующейся сильным ветром, метелями, снегопадами, плохой видимостью и низкой облачностью.

В ходе реализации эксперимента предполагается осуществить сбор данных (как наземных, так и дистанционных, включающих информацию с бортов воздушных судов) в периоды интенсивных наблюдений, отработать на этих данных методики наукастинга и провести верификацию для детерминистских и вероятностных типов наукастов. Для верификации полученной продукции необходимо также собрать информацию ОрВД о плотности полетов, загруженности авиатрасс, задержке рейсов и убытках (для подсчета экономического эффекта от внедрения систем наукастинга). Предполагается организация учебных семинаров по наукастингу и по вопросам интеграции и верификации продукции наукастинга для распространения накопленного опыта по всему миру.

Российская Федерация, также намеревающаяся присоединиться к международному проекту AvRDP, пока не имеет опыта в реализации систем наукастинга, предназначенных для авиации. Однако метеослужба нашей страны получила бесценный опыт в прогнозировании текущей погоды в рамках реализации международного проекта FROST-2014 (Forecast and Research in the Olympic Soch Testbed), инициированного для метеорологического обеспечения Олимпийских и Паралимпийских игр в Сочи. [5]. Одной из целей данного проекта было развитие систем наукастинга зимней

погоды для территории со сложным рельефом. Прежде всего это касается организации учащенных наблюдений с помощью различных систем наблюдения и разработки методов их комплексирования. Кроме того, для района Сочи в период Олимпиады была инсталлирована и внедрена в оперативную практику модель COSMO-Ru1, считающая прогнозы на сетке 1,1 км и использующая при этом модельную орографию с высоким пространственным разрешением (~30 м) [6]. В районе со сложными физико-географическими и орографическими условиями довольно успешно прогнозировалась, среди прочего, видимость.

На сегодняшний день на роль российских участников в проекте AvRDP претендуют международный аэропорт Пулково (Санкт-Петербург, около 130 взлетно-посадочных операций в сутки) и один из международных аэропортов Московского аэроузла (Шереметьево или Домодедово, выполняющие порядка 700–800 ВПО в сутки). Хотя эти аэропорты отличаются многообразием погодных условий, оказывающих влияние на деятельность авиации, в качестве начального предиктанта предполагается выбрать грозовую конвекцию в теплый период года, наблюдения за которой проводятся с использованием радаров, спутников и системы грозопеленгации.

Список использованных источников

1. ВМО-№ 485. Наставление по глобальной обработке данных и прогнозированию. Том 1. Глобальные аспекты. (Дополнение к IV Техническому регламенту ВМО). Изд. 2010 г.
2. ВМО-№49. Технический регламент. Том II. Метеорологическое обслуживание международной аэронавигации. – 2013. – 189 с.
3. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического локатора ДМРЛ-С в синоптической практике. – М.: Росгидромет, 2014. – 110 с.
4. *Иванова А.Р.* Наклон тропопаузы как характеристика ее деформации // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 2. – С. 17–29.
5. *Киктев Д.Б., Астахова Е.Д., Зарипов Р.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В., Цырульников М.Д.* Проект FROST-2014 и метеорологическое обеспечение Олимпиады «Сочи-2014» // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 8. – С. 19–30.

6. Шатунова М.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Прогноз видимости 16–18 февраля 2014 г. в районе проведения Олимпийских игр в Сочи с помощью модели COSMO-Ru1 // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 8. – С. 45–55.
7. Hagelin S., Auger A., Brovelli P., Dupont O. Nowcasting with the AROME Model: First Results from the High-Resolution AROME Airport // *Weather and Forecasting*. – 2014. – Vol. 29. – P. 773–787.
8. Holzapfel F., Robins R.E. Probabilistic two-phase aircraft wake vortex model: Application and Assesment // *J. Aircraft*. – 2004. – Vol. 41. – P. 1117–1126.
9. ICAO Doc 9750-AN/963. 2013-2028 Global Air Navigation Plan. – 2013.
10. Isaac G.A., Bailey M., Boudala F.S., Burrows W.R., Cober S.G., Crawford R. W., Donaldson N., Gultepe I., Hansen B., Heckman I., Huang L.X., Ling A., Mailhot J., Milbrandt J.A., Reida J., Fournierc M. The Canadian Airport Nowcasting System (CAN-Now) // *Meteorol. Appl.* – 2011. –Vol. 21. – P. 30–49.
11. Keis F. WHITE – Winter hazards in terminal environment: An automated nowcasting system for Munich Airport // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2014. – Vol. 24, No. 1. – P. 61–82.
12. Pierce C., Seed A., Ballard S., Simonin D., Zhihong Li. Nowcasting // Doppler radar observations – weather radar, wind profiler, ionospheric radar and other advanced applications. – InTech, 2012. – P. 97–142.
13. Rasmussen R., Dixon M., Hage F., Cole J., Wade C., Tuttle J., McGettigan S., Carty T., Stevenson L. Weather Support to Deicing Decision Making (WSDDM): A Winter Weather Nowcasting System // *BAMS*. – 2001. – Vol. 82, No. 34. – P. 1–17.
14. Robasky F., Clark D. Wind Forecast Algorithm to Support Wake Turbulence Mitigation for Departures (WTMD) // 13th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology (ARAM), New Orleans, LA, Amer. Meteor. Soc., 2008.
15. Rudack D.E., Ghirardelli J.E. A comparative verification of localized aviation model output statistics program (LAMP) and numerical weather prediction (NWP) model forecasts of ceiling height and visibility // *Weather and Forecasting*. – 2010. – Vol. 25. – P. 1161–1178.
16. Sieglaff J.M., Cronce L.M., Feltz W.F., Bedka K.M., Pavolonis M.J., Heidinger A.K. Nowcasting convective storm initiation using satellite-based box-averaged cloud-top cooling and cloud-type trends // *J. Appl. Meteor. Climatol.* – 2011. – Vol. 50. – P. 110–126.

17. Wagner T.T. Numerical weather and climate prediction. – Cambridge University Press, 2011. – 526 p.

18. Wilson J.F., Feng Y., Chen M., Roberts R.D. Nowcasting Challenges during the Beijing Olympics: successes, failures and implications for future nowcasting systems // Weather and Forecasting. – 2010. – Vol. 25. – P. 1691–1714.

19. http://ruc.noaa.gov/pdf/NCEP_PSR_2014_HRRR_COMBINED_lite.pdf.

20. <http://www.nwcsaf.org/HD/MainNS.jsp>

21. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/146998.pdf>

22. http://www.hko.gov.hk/education/article_e.htm?title=ele_00448

23. <http://www.haic.eu/partners/meteo-france-met-fr/>

Поступила в редакцию 09.03.2016 г.

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ПОТОКА, ХАРАКТЕРИСТИК ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ И ГРАДА ПО РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.А. Алексеева, Б.Е. Песков

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
alekseeva@mecom.ru*

Введение

Метеорологические радиолокаторы (МРЛ) являются уникальным средством наблюдений, позволяющим в режиме реального времени получать информацию о расположении и интенсивности зон активной конвекции и связанных с ними опасных конвективных явлений погоды. Создаваемая в России сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ-С) предназначена для проведения непрерывных наблюдений в составе радиолокационной сети Росгидромета по единому регламенту с использованием одного программного обеспечения. В некогерентном режиме измерений («Отражаемость») принцип действия ДМРЛ-С и локаторов типа МРЛ-2 и МРЛ-5 совпадает: радиус обнаружения опасных явлений погоды близок к радиусу некогерентных МРЛ, одинаков также и перечень конечных радиолокационных продуктов.

На этапе активного освоения ДМРЛ-С метеорологические продукты, генерируемые ими, проходят валидацию, разрабатываются методические рекомендации по их использованию в синоптической практике [2]. Учитывая опыт диагноза и прогноза опасных конвективных явлений погоды по данным метеорологических радиолокаторов типа МРЛ-2 [12], можно оценить максимальную скорость конвективного потока, интенсивность и накопленное количество ливневых осадков за любой промежуток времени,

выпадение и размер града на подстилающую поверхность по информации ДМРЛ-С. Поэтому исследования по усовершенствованию методов диагноза конвективных явлений, адаптации зарекомендованных на практике расчетных методов, использующих информацию некогерентных локаторов, к информации ДМРЛ-С являются актуальными и значимыми для практики.

Используемые данные

Для исследования использованы следующие виды данных:

1) радиолокационная информация:

– максимальная радиолокационная отражаемость радиолокатора МРЛ-2 ($\lg Z_m$);

– максимальная радиолокационная отражаемость ДМРЛ-С (dBZ_m , dBZ).

Для перевода радиолокационной отражаемости $\lg Z_m$, выраженной через радиус частиц, в dBZ_m используется соотношение [2]:

$$dBZ_m = 10 \lg Z_m + 18; \quad (1)$$

– высота верхней границы радиозона кучево-дождевых облаков (H_m , км);

2) проконтролированные макеты данных фактического радиозондирования атмосферы в пунктах из базы данных Гидрометцентра России на Европейской территории России.

Расчет максимальной скорости конвективного потока по радиолокационным данным

Наличие положительной энергии неустойчивости [9, 14] является характеристикой состояния атмосферы, указывающей на возможность развития и интенсивность мощной («глубокой») конвекции, а также интенсивность восходящих конвективных потоков, вертикального переноса насыщенной массы воздуха, конденсации водяных паров, образования зон аккумуляции осадков. Использование радиолокационных данных позволяет обнаруживать без расчета модели конвекции кучево-дождевые облака, с которыми связано возникновение опасных конвективных явлений.

Из исследований по использованию данных МРЛ [1, 3–6, 12, 14] известно, что существует связь между количественными характеристиками конвективной неустойчивости и радиолокационными параметрами облака. Установлено, что наиболее тесно с характеристиками неустойчивости атмосферы связаны такие радиолокационные параметры, как Hm и $\lg Zm$.

Согласно [12], максимальная конвективная скорость $Wm_{МРЛ}$ (м/с) может быть оценена по данным МРЛ, используя произведение Hm и $\lg Zm$:

$$Wm_{МРЛ} = 0,38 Hm \lg Zm + 3,52. \quad (2)$$

Максимальная конвективная скорость по данным ДМРЛ-С с учетом (1) и (2) рассчитывается по формуле:

$$Wm_{ДМРЛ-С} = 0,038 Hm (dBZm - 18) + 3,52. \quad (3)$$

В [2] показано, что кучево-дождевым облакам соответствует отражаемость ДМРЛ-С 10–15 dBZ и более.

В [1] получено уравнение регрессии между максимальной конвективной скоростью Wm , рассчитываемой по данным радиозондирования атмосферы по методу Н.И. Глушковой [11], и $Wm_{МРЛ}$, рассчитываемой по данным МРЛ:

$$Wm = 1,33 Wm_{МРЛ} + 4,0. \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (3) для расчета максимальной конвективной скорости по данным ДМРЛ-С преобразуется:

$$Wm = 1,33 [0,038 Hm (dBZm - 18) + 3,52] + 4,0. \quad (5)$$

**Методы диагностики образования града в облаке
и выпадения его на подстилающую поверхность
по радиолокационным данным**

Согласно [7], вероятность определения погоды с градом по данным МРЛ составляет всего 54 % и совпадает с вероятностью определения ее по данным средней плотности сети с учетом всех метеорологических станций и постов. Столь низкую вероятность

определения погоды с градом по данным МРЛ можно объяснить двумя причинами: а) град плохо обнаруживается сетью станций наблюдений, в т. ч. со сравнительно высокой плотностью (как, например, в Москве и Московской области); б) радиолокационный метод позволяет определять град только в облаке. Результаты по валидации диагностики града ДМРЛ-С пока нет. Наши исследования направлены на улучшение методики распознавания погоды с градом по радиолокационным данным сети ДМРЛ-С.

Для образования града в облаке необходимо, чтобы его верхняя граница достигла уровня естественной кристаллизации. Кроме того, его образование определяется соотношением между переохлажденной частью облака и теплой, что обуславливает нужную концентрацию зародышей града в облаке [12].

В Руководстве [10] описан метод прогноза гроз и града Н.И. Глушковой и В.Ф. Лапчевой, основанный на зависимости условий возникновения гроз и града от температуры на верхней границе радиоэха от кучево-дождевого облака (t_g) и высоты изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (H_0) над подстилающей поверхностью. Прогнозирование гроз и града осуществляется графическим способом (рис. 1).

Демаркационные линии на рисунке разделяют области «без грозы и града», «гроза», «град с грозой». Представленные кривые трудно описать математически, что затрудняет автоматизацию метода. Отметим, что температура на верхней границе радиоэха от кучево-дождевого облака радиолокационным способом не определяется, а высота нулевой изотермы определяется только при наличии радиоэха обложных осадков. Одной из особенностей такого радиоэха является наличие на вертикальном профиле «яркой полосы» – зоны повышенной (на 5–10 dBZ) отражаемости толщиной порядка 300–500 м, располагающейся немного ниже уровня нулевой изотермы [2]. «Яркая полоса» возникает в районе нулевой изотермы при переходе частиц осадков из твердой фазы в жидкую, при этом сначала в присутствии капель воды происходит слипание отдельных снежинок в снежные хлопья, которые имеют существенно больший размер по сравнению со снежинками и дождевыми каплями.

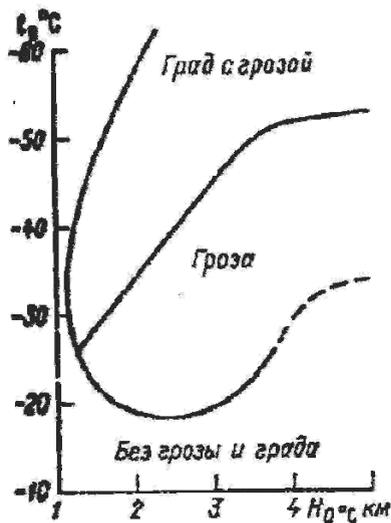


Рис. Связь условий возникновения гроз и града с температурой воздуха на верхней границе радиозаха и высотой изотермы 0°C [10].

В настоящее время рекомендуется использовать значения t_e и H_0 из прогнозов современных мезомасштабных моделей атмосферы.

Нами ставилась цель разработать метод автоматизированной диагностики града, выпадающего на подстилающую поверхность.

Используя параметры атмосферы t_e и H_0 , аналогично методу прогнозирования грозы и града [10], сделана попытка получения линейной разделяющей функции L . Использованы аэрологические и радиолокационные данные за теплые периоды (май-сентябрь) 1976 и 1979–1981 годов.

По данным радиолокационных наблюдений определялась верхняя граница радиозаха от кучево-дождевого облака H_m , а по данным радиозондирования атмосферы в ближайшем по времени и расстоянию пункте — температура на этой высоте и высота изотермы 0°C над подстилающей поверхностью.

В результате исследования получена разделяющая функция

$$L = -0,064 t_g - 1,061 H_0 - 0,0064, \quad (6)$$

где t_g – температура на высоте Hm ; H_0 – высота изотермы 0°C .

Рассчитанные по (6) величины $L > 0$ указывают на возможность выпадения града на подстилающую поверхность. Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность на зависимой выборке представлены в табл. 1. Как видно, разделяющая функция (6) уже на зависимой выборке с недостаточной точностью разделяет случаи с градом и без града. Повидимому, случаи отсутствия града в зоне «диагностируется град» могут быть объяснены его таянием при падении через теплую часть облака. Сделан вывод, что для диагностики выпадения града на подстилающую поверхность недостаточно учитывать лишь указанные выше параметры.

Известно, что размер града связан с величиной максимальной конвективной скорости Wm [14], которую можно рассчитать по произведению радиолокационных параметров согласно (2) [12].

Для диагностики выпадения града на подстилающую поверхность, учитывая сказанное выше, получена зависимость с новыми характеристиками:

$$L_1 = -1,619 H_0 + 0,158 Hm \lg Zm + 0,6. \quad (7)$$

Как и $L(6)$, величины $L_1 > 0$ используются для оценки возможности выпадения града на подстилающую поверхность. Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность по формуле (7) на зависимой выборке представлены в табл. 1.

Рассмотрен также вариант разделения случаев с градом и без града по трем параметрам. Разделяющая функция имеет вид:

$$L_2 = -0,039 t_g - 1,877 H_0 + 0,147 Hm \lg Zm - 0,139. \quad (8)$$

При $L_2 > 0$ диагностируется выпадение града на поверхность Земли. Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность по формуле (8) на зависимой выборке представлены в табл. 1. Как можно судить по результатам

оценки, добавление третьего параметра к предыдущим двум несколько ухудшило все показатели оправдываемости диагностики выпадения града на подстилающую поверхность.

Таблица 1

Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность по расчетным уравнениям (6) – (11)

Показатели качества	Расчетное уравнение			
	L (6)	L_1 (7)	L_2 (8)	L_4 (10) и L_5 (11)
Зависимая выборка				
U	65,9	82,5	79,4	–
$Uя$	62,1	76,8	74,6	–
$Uб/я$	70	89,5	84,7	–
$Ря$	69,5	89,8	84,7	–
$Рб/я$	62,7	73,9	74,6	–
Независимая выборка				
U	–	79,3	74,4	84,7
$Uя$	–	42	41	66,6
$Uб/я$	–	80	78	95,5
$Ря$	–	80,5	76,3	90
$Рб/я$	–	-	–	82,7
Критерий Багрова	–	0,586	0,488	0,54
Критерий Пирси-Обухова	–	0,585	0,49	–
Критерий Обухова	–	0,585	0,48	–

Примечание: U – общая оправдываемость, %; $Uя$ – оправдываемость явления, %; $Uб/я$ – оправдываемость без явления, %; $Ря$ – предупрежденность явления, %; $Рб/я$ – предупрежденность без явления, % [13].

Предложенные методы расчета разделяющих функций L_1 (7) и L_2 (8) проверены на независимом материале. Проанализировано 82 случая диагностики выпадения града на подстилающую поверхность (теплый период 1977, 1978 и 1984 гг.). Диагноз считался правильным, если диагностировался град, а выпадение града на поверхность Земли отмечалось в радиусе 100 км от пункта

диагностики. Из 82 случаев оправдалась диагностика выпадения града на подстилающую поверхность в 65 случаях по разделяющей функции (7) и в 61 случае – по (8). Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность на независимой выборке представлены в табл. 1. Видно, что все характеристики качества диагностики по L_1 (7) лучше, чем по L_2 (8).

Для данных ДМРЛ-С разделяющая функция L_3 будет иметь вид:

$$L_3 = -1,619 H_0 + 0,0158 Hm(dBZm - 18) + 0,6. \quad (9)$$

На возможность выпадения града на подстилающую поверхность указывают величины $L_3 > 0$.

В [6] представлен метод прогноза выпадения града на подстилающую поверхность с использованием тех же характеристик атмосферы. Сначала по зависимости

$$L_4 = -24,3 H_0 - t_g + 36,5 \quad (10)$$

определяется возможность образования града в облаке ($L_4 \geq 0$), а затем определяется возможность выпадения града на подстилающую поверхность по функции

$$L_5 = 0,04 Hm \lg Zm - H_0 + 1,7. \quad (11)$$

При условии $L_5 > 0$ диагностируется выпадение града на подстилающую поверхность.

Результаты проверки метода по $L_4 > 0$ и $L_5 > 0$ на независимой выборке в Москве и Московской области см. в табл. 1.

Расчетные уравнения возможности выпадения града на подстилающую поверхность по информации ДМРЛ-С необходимо проверить на реальных данных измерений сети доплеровских локаторов после окончания их валидации с целью выбора наиболее точных разделяющих функций.

Расчет размера града

Важной характеристикой выпадающего на подстилающую поверхность града является его размер, так как от него зависит

возможный ущерб. Радиус града (см) в облаке рассчитывается по формуле

$$r_0 = \frac{Wm^2 \cdot 10^4}{\gamma^2}, \quad (12)$$

где Wm – максимальная конвективная скорость, м/с; γ – коэффициент, зависящий от лобового сопротивления градины; при $5 \leq Wm < 10$ $\gamma = 1,33 \cdot 10^3 \sqrt{\text{см/с}}$, при $Wm \geq 10$ $\gamma = 2,3 \cdot 10^3 \sqrt{\text{см/с}}$.

Радиус града в облаке по данным ДМРЛ-С:

$$r_0 = \frac{[1,33(0,038 Hm (dBZd - 18) + 3,52) + 4]^2 \cdot 10^4}{\gamma^2}. \quad (13)$$

Экспериментально выяснено [5], что градины диаметром 3 см и более, пролетая через теплую часть атмосферы, тают незначительно, т. е. при максимальной скорости конвективного потока в облаке более 30 м/с размер града можно определять непосредственно из уравнений (12), (13). Если диаметр градин в облаке менее 3 см, то при падении через теплые слои атмосферы они заметно тают, поэтому радиус града, выпадающего на подстилающую поверхность, зависит от высоты изотермы 0°C (H_0). Согласно [4, 9, 14], уменьшение радиуса образовавшегося в облаке града за счет таяния при падении определяется соотношением $r_{\text{паст}} = 0,13H_0$ (H_0 , км). Таким образом, радиус града, выпадающего на подстилающую поверхность, можно рассчитать:

$$R_{\text{земля}} = r_0 - r_{\text{паст}}. \quad (14)$$

Диагностика характеристик ливневых осадков по радиолокационной информации

1. Диагностика интенсивности осадков

По ДМРЛ-С интенсивность осадков определяется согласно известному соотношению Маршалла и Пальмера [2]:

$$Z = A \cdot R^b, \quad (15)$$

где Z – отражаемость, $\text{мм}^6/\text{м}^3$; R – интенсивность, мм/ч .

Заметим, что значения параметров A и b могут сильно изменяться не только в зависимости от типа дождей и географических условий, но даже в пределах одного типа дождей. Результаты валидации данных сети доплеровских локаторов [2] также указывают на необходимость дальнейшего уточнения зависимости (15), особенно при выпадении сильных ливней. Ниже изложен один из вариантов такого уточнения.

Согласно [2], для определенного типа облачности характерны определенные значения отражаемости, измеренные ДМРЛ-С. Интенсивность ливневых осадков определяется, если значения отражаемости характеризуют кучево-дождевые облака, а не вершины C_s , C_c , A_s , A_c , N_s . Хорошо известна и физически понятна [8, 14] тесная связь максимальной интенсивности конвективных осадков с максимальной конвективной скоростью.

В [3] представлен метод расчета интенсивности ливневых осадков по данным МРЛ. По данным наблюдений об интенсивности и количестве осадков по плювиографу и мощности облаков по данным МРЛ установлена эмпирическая формула для средней интенсивности осадков, выпадающих из фронтальных облачных систем \bar{I} (мм/мин)

$$\bar{I} = 0,00043 Wm^2 . \quad (16)$$

Применительно к данным ДМРЛ-С эту зависимость можно представить в виде:

$$\bar{I} = 0,00043 [(0,05 Hm (dBZd - 18) + 3,52) + 4,0]^2 . \quad (17)$$

Нами предложен способ расчета интенсивности осадков I (мм/ч) с использованием Wm , м/с:

$$I = 2,4 Wm . \quad (18)$$

Проанализируем полученное уравнение (табл. 2).

Видно соответствие Wm и I во всем диапазоне максимальной конвективной скорости.

Уравнение для расчета интенсивности осадков I (мм/ч) применительно к информации ДМРЛ-С имеет вид:

$$I = 3,19 [0,038 Hm (dBZd - 18) + 3,52] \pm 9,6 . \quad (19)$$

Результаты анализа уравнения (18)

$Wm, \text{ м/с}$	$I, \text{ мм/ч}$
≤ 6	< 15
7–12	15–30
13–20	31–50
≥ 21	> 50

2. Диагностика накопленной суммы осадков

Сравнение данных об осадках ДМРЛ-С с фактическими проводится не по интенсивности осадков, а по накопленной сумме осадков за 1, 6 и 12 ч. В настоящее время осадки на сети метеорологических станций наблюдений измеряются на некоторых станциях за период 6 ч и на большинстве станций за 12 часов.

Самые значительные осадки – ливни из Cb продолжаются около часа. Реально накопленная сумма осадков в ливне тесно связана с интенсивностью и со скоростью перемещения кучево-дождевого облака Cb (V) над пунктом измерения осадков. Скорость перемещения Cb достаточно точно вычисляется по ДМРЛ-С. Чем больше скорость перемещения Cb , тем быстрее облако пройдет над измерителем осадков, тем короче промежуток времени попадания осадков в «ведро» (тем меньше осадков попадет в измеритель при одной и той же интенсивности осадков). Чаще всего количество осадков составляет долю « k » от интенсивности осадков, и тем меньшую, чем больше скорость перемещения облака и меньше диаметр облака.

При построении регрессионного уравнения для расчета количества накопленных осадков за определенный промежуток времени, учитывались только основные параметры. Полученная регрессионная зависимость имеет вид:

$$Q = I (1 - 0,005 \cdot V), \quad (20)$$

где Q – количество накопленных осадков за определенный промежуток времени, мм; I – интенсивность осадков, мм/ч; V – скорость перемещения облака, км/ч.

Оценим полученную нами зависимость (табл. 3).

Таблица 3

Накопленные суммы осадков в зависимости от интенсивности осадков и скорости перемещения кучево-дождевых облаков

Интенсивность осадков, I, мм/ч	Скорость перемещения Cb, V, км/ч	Накопленная сумма осадков, Q, мм
30	100	15
	50	22,5
	25	26,2
	10	28,5
	0	30
60	100	30
	50	45
	25	52,5
	10	57
	0	60

Из табл. 3 видно, что чем больше интенсивность осадков, тем в целом больше накопленные суммы осадков; чем больше скорость перемещения облака, тем меньше накопленные суммы осадков. Получаемые оценки соответствуют опыту работы синоптика [11]:

– сильный ливень с количеством осадков больше 50 мм бывает при $I \geq 60$ мм/ч и небольшой скорости переноса облака $V < 30$ км/ч;

– сильный ливень (в предгорьях и горах) с количеством осадков больше 30 мм/ч бывает при интенсивности осадков около 60 мм/ч и любой скорости переноса облака на фронте, а также при интенсивности осадков около 30 мм/ч, но только в малоподвижном Cb (в центральной части циклона).

Возможно, для уточнения параметров дождей по данным ДМРЛ-С с помощью полученных уравнений потребуются корректировка коэффициентов для разных географических районов и времени года.

В [15] было показано, что продолжительность существования крупномасштабной облачности довольно велика: не менее 12 ч в 15 % случаев, более 24 ч в 85 % случаев. В [3] показано, что продолжительность существования радиоэха с максимальными значениями параметров Hm и $\lg Zm$ от облаков крупномасштабной облачной системы в 90 % случаев более двух суток. Поэтому все изложенные результаты данного исследования по диагностике ливней и града в дальнейшем можно применять для уточнения прогноза этих опасных явлений при прохождении атмосферных фронтов, связанных с активными циклонами.

Выводы

Получены расчетные уравнения для определения: а) максимальной скорости конвективного потока, б) возможности образования в кучево-дождевом облаке и выпадения града на подстилающую поверхность, в) интенсивности и накопленных сумм осадков по данным ДМРЛ-С.

После валидации данных ДМРЛ-С все предложенные уравнения предполагается протестировать на расширенной выборке. Также предполагается создать новые информационные продукты по данным ДМРЛ-С: карты максимальной скорости конвективного потока, интенсивности и накопленных сумм ливневых осадков, града, выпадающего на подстилающую поверхность. Изложенные в данной статье результаты исследований могут использоваться синоптиками при краткосрочном и сверхкраткосрочном прогнозировании развития зон активной конвекции с опасными конвективными явлениями погоды.

Список использованных источников

1. Алексеева А.А., Глушкова Н.И. Диагноз и прогноз интенсивной конвекции и связанных с нею опасных конвективных явлений // Труды Гидрометцентра России. – 1993. – Вып. 326. – С. 68–72.
2. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. – М.: Росгидромет, 2014. – 110 с.

3. Глушкова Н.И. Некоторые результаты исследования по усовершенствованию диагноза и прогноза осадков по данным МРЛ // Труды Гидрометцентра СССР. – 1980. – Вып. 220. – С. 77–83.
4. Глушкова Н.И. Условия выпадения сильных ливней и града // Труды Гидрометцентра СССР. – 1981. – Вып. 233. – С. 3–9.
5. Глушкова Н.И., Минакова Н.Е. Прогноз града. Дополнение № 1 к Руководству по краткосрочным прогнозам погоды. Часть II, издание второе. – М.: Гидрометеиздат, 1967. – 11 с.
6. Глушкова Н.И., Алексеева А.А. Прогноз града и размеров градин по радиолокационным данным // Труды Гидрометцентра СССР. – 1989. – Вып. 299. – С. 16–22.
7. Лапчева В.Ф. О методике оценки прогнозов конвективных явлений // Труды Гидрометцентра СССР. – 1980. – Вып. 220. – С. 99–110.
8. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 569 с.
9. Мэйсон Б.Дж. Физика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 542 с.
10. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации // под ред. К.Г. Абрамович, А.А. Васильева. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 308 с.
11. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 702 с.
12. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли.
13. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов.
14. Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 183 с.
15. Шишкин Н.Н. О прогнозе количества осадков в горных районах // Труды ГГО. – 1966. – Вып. 186. – С. 38–44.

Поступила в редакцию 19.04.2016 г.

СУТОЧНЫЙ ХОД ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВОЗДУХ ВЕЩЕСТВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ И РАСЧЕТАМ ХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

*И.Ю. Шалыгина¹, И.Н. Кузнецова¹, М.И. Нахаев¹,
И.Б. Коновалов², Е.В. Березин²*

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

*²Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
shalygina@mecom.ru, muza@mecom.ru*

Введение

Численный прогноз загрязнения воздуха с использованием химических транспортных моделей (ХТМ) – обычная практика оценки качества воздуха в зарубежных странах; как и данные наблюдений, прогнозы отдельных концентраций и индекса качества воздуха доступны для широкого круга пользователей (например, db.eurad.uni-koeln.de/index_ref.prognose/tmeur.html, aqicn.org/city/moscow/shabol).

Москва – один из немногих отечественных городов с развитой сетью автоматизированных наблюдений за взвешенными частицами, малыми газовыми примесями и некоторыми летучими органическими соединениями (ГПБУ «Мосэкомониторинг»); данные о содержании загрязняющих веществ в воздухе оперативно представляются на сайте (<http://www.mosecom.ru>) для информирования населения города о качестве московского воздуха. Наличие данных с высоким временным и пространственным разрешением – важный фактор для перехода от статистических методов прогнозирования к численному прогнозу качества воздуха с применением химической транспортной модели. В Гидрометцентре России создана технология расчета концентраций загрязняющих веществ, основой

которой являются две химические транспортные модели – COSMO-Ru7-ART и XTM CHIMERE [14, 15, 17], использующие различные кадастры эмиссий (<http://www.emep.int>, <https://www.tno.nl/en/>). Модель COSMO-Ru7-ART развивается в рамках консорциума COSMO, является встроенной в модель атмосферы COSMO-Ru7 и предусматривает описание эффекта влияния загрязнений на атмосферные процессы [17].

Принципиальным отличием другой используемой в технологии модели – XTM CHIMERE – является автономность расчетов концентраций загрязнений с усвоением на каждом временном шаге прогнозных метеорологических характеристик [18, 20, 22]. На этапе становления технологии расчеты по XTM CHIMERE проводились с усвоением данных модели атмосферы WRF-ARW [9, 23]. Сегодня обе химические транспортные модели используют прогнозы метеорологических характеристик одной модели COSMO-Ru7 [2], что оправдано и с точки зрения повышения эффективности расчетных экспериментов, нацеленных на установление причин модельных погрешностей прогнозов двух XTM, и с позиций разработки способов постобработки, в т. ч. планируемого ансамблирования модельных расчетов.

Целью представленного в этой статье исследования, являющегося частью многоплановой работы по верификации XTM, является оценка успешности модельных расчетов суточного хода путем сравнения с внутрисуточным циклом концентраций малых газовых примесей (МГП) и взвешенных частиц, установленного по измерениям на автоматизированных станциях контроля загрязнения (АСКЗА) в Москве. Успешность воспроизведения XTM внутрисуточной различающейся по сезонам изменчивости концентраций примеси является информативным индикатором качества расчетов многих модельных характеристик. В их числе средняя и максимальная за сутки концентрация загрязняющих веществ (используются для оценки соблюдения гигиенических нормативов [4]), адекватность суточного распределения эмиссий [6, 20] и их величины, согласованность изменчивости уровня загрязнения с термическим и динамическим перемешиванием и мн. др.

Для оценки успешности динамики модельного суточного хода необходимо опираться на надежные данные о короткопериодных колебаниях приземных концентраций. Анализ суточного хода

концентраций газовых и аэрозольных загрязнений посвящен значительный ряд зарубежных научных публикаций (например, [21, 24]), временные вариации загрязнений в приземном воздухе Лондона обсуждаются в [10]. По данным измерений концентраций загрязняющих веществ в воздухе Москвы отдельными группами исследователей проведены разноплановые исследования [1, 3, 5, 11]; одна из последних публикаций подготовлена по наблюдениям на станции экологического мониторинга ИФА РАН – МГУ, в ней обсуждаются сезонные особенности суточного хода МГП (CO , NO , NO_2 , SO_2 и O_3) [7, 8].

Выполненный нами анализ суточного хода приземных концентраций загрязняющих веществ по наблюдениям и модельным расчетам нацелен на подготовку рекомендаций для постобработки расчетов ХТМ; для этого важно понимать не только закономерности сезонной изменчивости и суточной динамики отдельных веществ, но и особенности пространственной неоднородности полей концентрации. В статье представлены некоторые результаты расчетов и сравнений для центральных месяцев четырех сезонов.

Использованные данные

Данные наблюдений. Используются данные автоматизированных измерений ГПБУ «Мосэкомониторинг» концентраций угарного газа (CO), диоксида азота (NO_2) и взвешенных частиц размером не более 10 мкм (PM_{10}) на АСКЗА в Москве (www.mosecom.ru). База данных для анализа сформирована по измерениям МГП на 25–35 АСКЗА, PM_{10} – на 13 станциях. Анализ усредненных для каждого часа концентраций, полученных по данным измерений с дискретностью 20 мин, проведен для центральных месяцев четырех сезонов (январь, апрель, июль, октябрь) 2015 г. – периода с максимальным числом действующих АСКЗА и высоким качеством измерений. В выбранный период экстремальных метеорологических ситуаций и высоких уровней загрязнения, которые могли повлиять на статистические показатели загрязнения, не наблюдалось.

Модельные расчеты. Для анализа использованы расчеты концентраций химической транспортной модели CHIMERE. Адаптация ХТМ CHIMERE в вычислительной среде Гидрометцентра России проводится совместно с ИПФ РАН (Нижний Новгород).

Оценивались прогностические величины почасовых концентраций CO, NO₂ и PM₁₀ в узлах модельной сетки (0,25°x0,25°) с усвоением метеорологических данных модели атмосферы COSMO-Ru7.

Суточный ход приземных концентраций CO, NO₂ и PM₁₀

Оксид углерода – долгоживущее вещество; основным источником его являются выбросы автотранспорта, на долю которого в Москве, по экспертным оценкам (mosecom.ru), приходится более 90 % выбросов загрязняющих МГП. Для расчета среднего суточного хода CO использованы данные измерений на расположенных в разных частях города 28 АСКЗА. Усредненный по всем АСКЗА суточный ход концентрации CO в срединных месяцах сезонов приведен на рис. 1, здесь же показана суточная динамика стандартного отклонения («усы» на боксовых диаграммах). Следует отметить, что в Москве средний уровень загрязнения приземного воздуха угарным газом низкий (mosecom.ru), в основном в 3–5 раз меньше гигиенических нормативов [4].

Вначале отметим, что рассчитанные нами суточные ходы концентрации CO согласуются с полученными другими исследователями [1, 3, 5, 7, 8, 11, 19]. На рис. 1 отчетливо видны совпадения формы суточного хода CO зимой и осенью с характерными ночным минимумом и слабовыраженным бимодальным дневным максимумом.

Обратное внутрисуточное распределение концентрации CO весной и летом: самый низкий уровень CO и минимальные величины СКО наблюдаются после полудня, основной суточный максимум формируется около полуночи, ночью уровень CO понижается, в 6–8 ч имеет место устойчивый вторичный максимум. Видно, что в теплый период суточный ход CO отличается высокой изменчивостью в ночное и утреннее время с 21 до 8 ч, что связано с увеличением повторяемости неблагоприятных для очищения воздуха метеорологических условий (НМУ) по сравнению с частотой НМУ в осенне-зимний период [1, 13].

Диоксид азота – продукт химических преобразований выбросов автотранспортом и предприятиями теплоэнергетики, вторичный загрязнитель воздуха с большим, чем

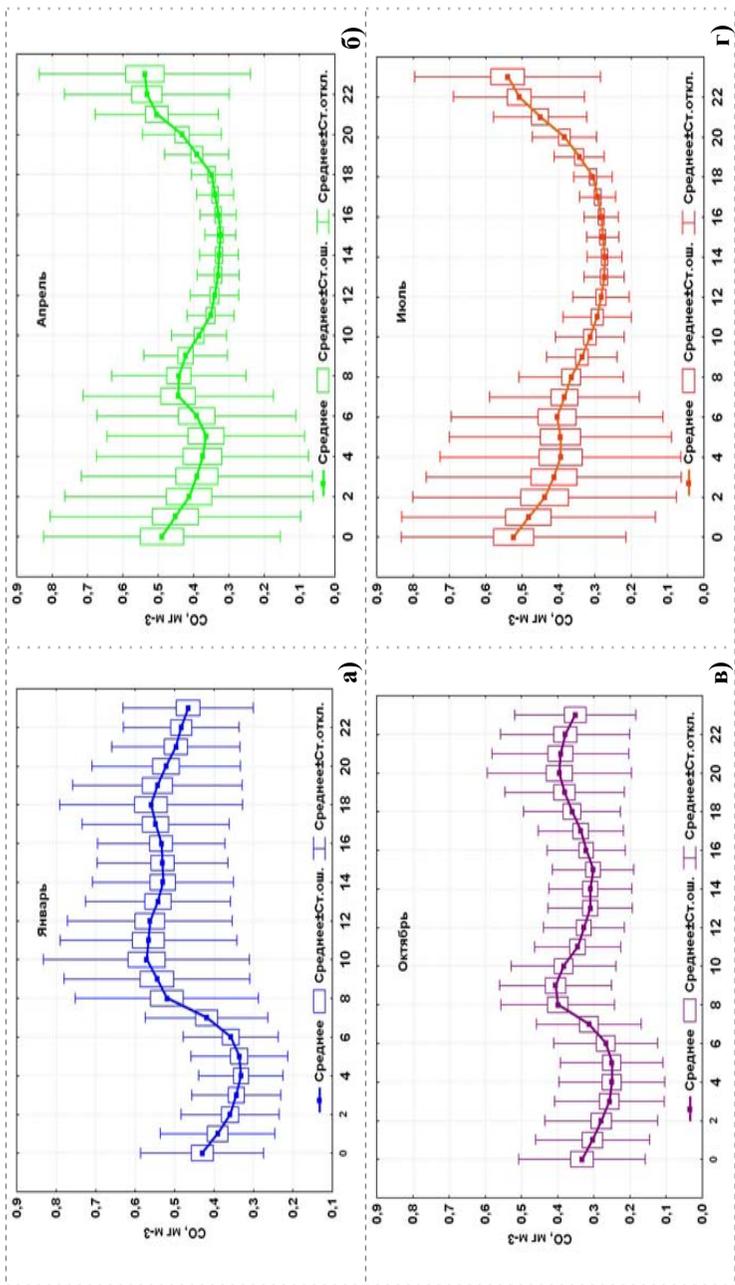


Рис. 1. Суточный ход усредненной по городским станциям концентрации CO январь (N=868) (а), апрель (N=840) (б), октябрь (N=868) (в), июль (N=868) (г). Москва, 2015 г.

предшественник, классом опасности [4]. Для расчета среднего суточного хода NO_2 использованы данные 27 АСКЗА городского и примагистрального типов. Усредненный суточный ход средних по городу концентраций в центральных месяцах сезонов приведен на рис. 2. Следует отметить, что в Москве средний уровень загрязнения приземного воздуха диоксидом азота в зимний и весенний сезоны повышенный – примерно на уровне ПДКс.с. ($0,04 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$), летом и осенью – в основном меньше гигиенических требований (mosecom.ru).

Можно заметить (рис. 2), что форма суточного хода концентраций NO_2 в каждый из сезонов совпадает с формой среднего суточного хода CO . Так же, как CO , усредненный суточный ход группируется по форме в два типа: весенне-летний и осенне-зимний (условно, суточный ход теплого и холодного сезонов).

В холодный сезон суточный минимум NO_2 наблюдается ночью. Днем осенью наблюдаются слабовыраженные утренний и вечерний максимумы, в зимнее время суточная амплитуда больше, более выражены утренний и вечерний максимумы NO_2 .

В апреле и июле основной суточный минимум отмечается в дневные часы (11–17 ч), главный суточный максимум формируется в околополуночные часы, утром (7–9 ч) наблюдается второй суточный максимум. Как и в суточной динамике CO , наибольшие флуктуации NO_2 (СКО) характерны для ночного и утреннего времени, что связано с увеличением частоты НМУ.

Взвешенные частицы PM_{10} (particulate matter) с размерами частиц от 1 до 10 мкм, вредное воздействие на организм человека которых оценивается Всемирной организацией здравоохранения как наиболее опасное [16], имеют как антропогенное, так и природное происхождение. Нередко повышение уровня PM_{10} в воздухе Москвы происходит вследствие ветрового подъема пылевых частиц или прихода загрязненной воздушной массы из районов весенних пахотных работ, лесных пожаров, песчаных бурь и почвенной засухи и пр. [3, 12].

На АСКЗА ГПБУ «Мосэкомониторинг» в основном измеряются массовые концентрации PM_{10} – взвешенных частиц размером не более 10 мкм (13 АСКЗА); контроль $\text{PM}_{2.5}$ проводится на 8 АСКЗА, что недостаточно для получения статистически надежных результатов.

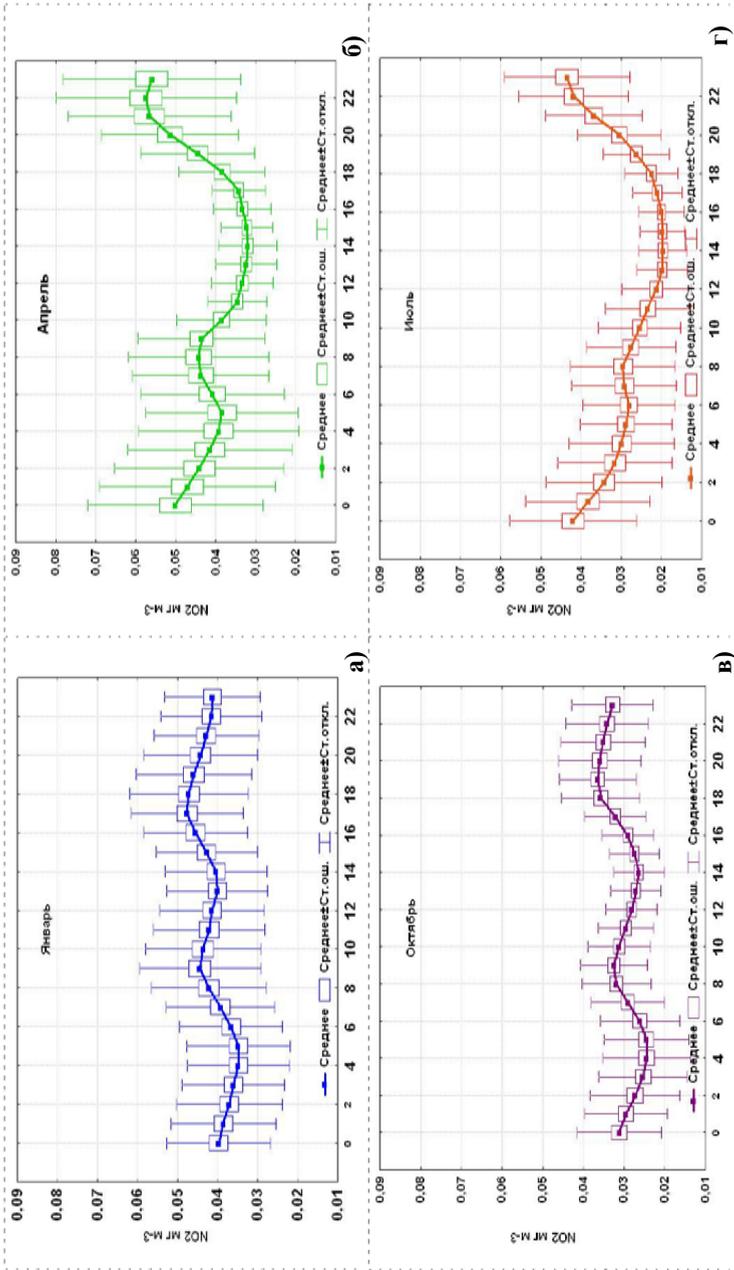


Рис. 2. Суточный ход усредненной по городским станциям концентрации NO_2 январь (N=837) (а), апрель (N=810) (б), июль (N=837) (в), октябрь (N=837) (г). Москва, 2015 г.

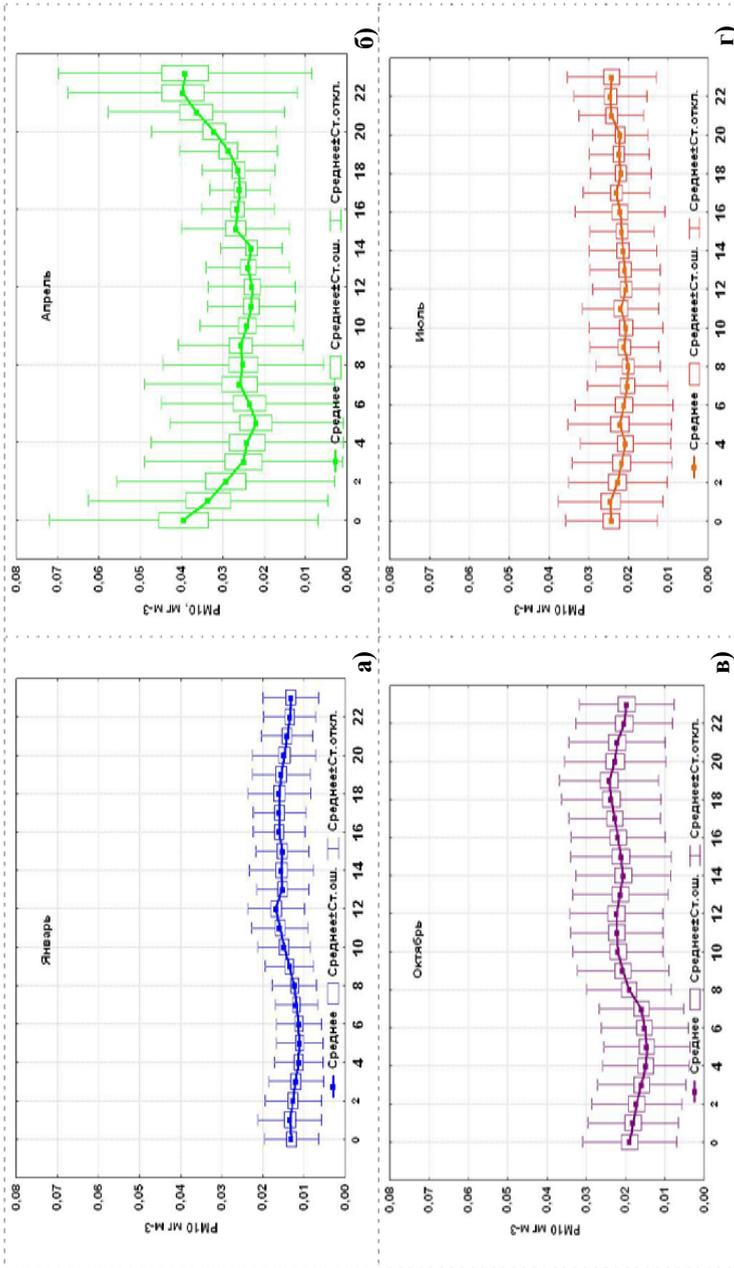


Рис. 3. Суточный ход усредненной по городским станциям концентрации PM₁₀ январь (N=403) (а), апрель (N=390) (б), июль (N=403) (в), октябрь (N=403) (г). Москва, 2015 г.

Рассчитанный по измерениям усредненный суточный ход средних по городу концентраций PM_{10} и стандартного отклонения представлен на рис. 3. Учитывая, что величина принятой в нашей стране предельно допустимой концентрации (ПДКс.с.) PM_{10} составляет $0,06 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ [4], можно сделать вывод, что уровень PM_{10} и его пространственно-временная изменчивость в Москве в среднем незначительны.

Приведенные на рис. 3 иллюстрации подтверждают, что зимой при наличии снежного покрова уровень PM_{10} самый низкий в году; о небольшом антропогенном вкладе PM_{10} в это время года свидетельствует едва заметный растянутый дневной максимум. Летом невыраженный усредненный по городу суточный ход PM_{10} по форме близок к зимнему и осеннему с той разницей, что суточному ходу в октябре свойственны наибольшие СКО.

Усредненный суточный ход PM_{10} весной резко отличается от других сезонов. Отдельно отметим, что на апрель приходится и годовой максимум PM_{10} . В апреле (в отсутствие растительного покрова подстилающей поверхности) наблюдается хорошо выраженная суточная амплитуда: суточный максимум PM_{10} формируется в околополуночное время, после полудня наблюдается суточный минимум, но его величина больше уровня максимумов в другие сезоны года. Высокую нестабильность фона PM_{10} в воздухе Москвы в апреле подтверждают величины стандартного отклонения – ночью они почти в 3 раза больше послеполуденных (0,03 и 0,01 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно). Приведенные результаты анализа указывают на специфические черты загрязнения воздуха Москвы взвешенными частицами и отличия от суточного и сезонного хода PM_{10} в европейских городах [21].

Сравнения наблюдаемого суточного хода CO , NO_2 , PM_{10} с модельными расчетами

Успешность модельного расчета суточного хода концентраций загрязняющих веществ отражается на качестве прогноза средней и максимальной за сутки величины. Именно по названным характеристикам принято оценивать прогнозы загрязнения приземного воздуха. В таблице приведены статистические показатели ошибок

модельных прогнозов ХТМ CHIMERE в холодный и теплый сезон 2015 года. Полученные на репрезентативной выборке результаты сравнений дали основание сделать главные выводы:

- имеет место сезонная устойчивость знака модельных ошибок концентраций каждого из рассматриваемых загрязняющих веществ: систематическое завышение CO, NO₂ и небольшое занижение PM₁₀;

- средние суточные концентрации рассчитываются с меньшими погрешностями по сравнению с ошибками прогноза максимальных за сутки концентраций.

Таблица

Статистические показатели ошибок модельных прогнозов средних суточных и максимальных за сутки концентраций загрязняющих веществ (мг·м⁻³) 2015 г.

Сезон	Вещество	Средняя суточная концентрация					Максимальная за сутки концентрация				
		измерение	модель	ошибка			измерение	модель	ошибка		
				δ	δ	σ			δ	δ	σ
Холодный	CO	0,39	0,58	0,21	0,30	0,36	0,84	1,03	0,24	0,63	0,85
	NO ₂	0,03	0,05	0,02	0,03	0,02	0,05	0,08	0,03	0,04	0,04
	PM ₁₀	0,02	0,01	-0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	-0,02	0,02	0,03
Теплый	CO	0,44	0,96	0,52	0,59	0,65	0,98	1,82	0,84	1,09	1,14
	NO ₂	0,03	0,08	0,05	0,05	0,04	0,06	0,13	0,08	0,08	0,07
	PM ₁₀	0,02	0,02	-0,01	0,01	0,01	0,05	0,03	-0,02	0,03	0,04

Примечание: δ – средняя ошибка, |δ| - средняя абсолютная ошибка, σ - среднее квадратическое отклонение.

Значительно больше информации дает анализ модельного воспроизведения суточного хода концентраций загрязняющих веществ. Различия между данными модельных расчетов и измерений определялись при использовании расчетов ХТМ на период 24–48 ч от срока 0 ч ВСВ; при этом начальные условия задавались

на основе расчетов в предшествующие трое суток с целью обеспечения квазистационарности полей концентраций загрязняющих веществ [9, 11].

Выполнены сравнения модельных величин с усредненными данными измерений на АСКЗА, расположенных внутри материнской ячейки (рис. 4), также проведены сравнения с измерениями концентраций на отдельных АСКЗА.

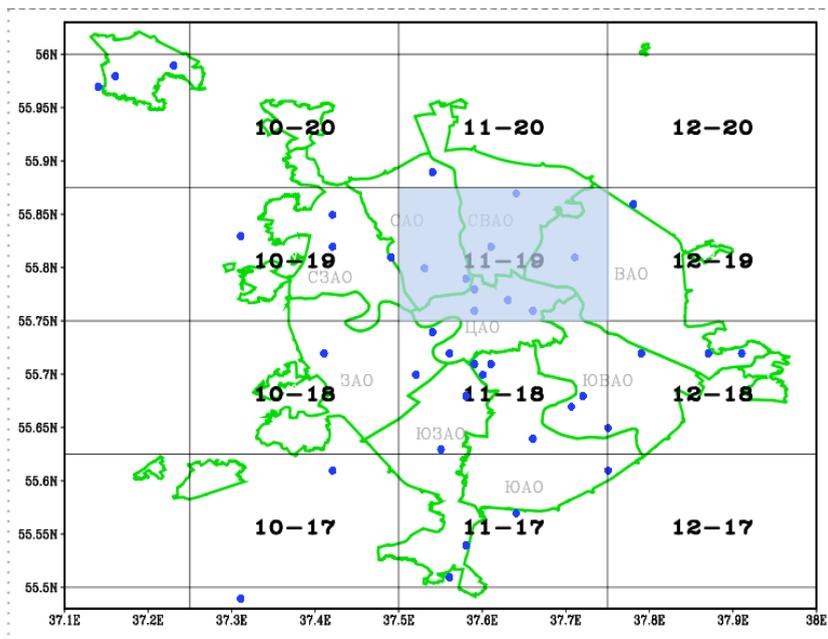


Рис. 4. Расчетная сетка XTM SHIMERE с заливкой модельной ячейки, результаты сравнительного анализа которой обсуждаются в работе.

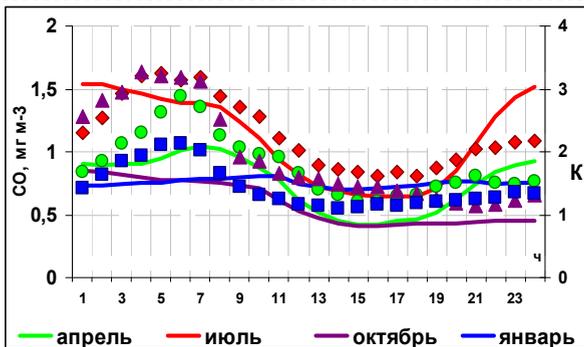
Рассмотрим характеристики и особенности модельных расчетов отдельных примесей, оценивая адекватность воспроизведения XTM формы суточного хода, внутрисуточных максимумов и внутрисуточной динамики величины отклонений модель – наблюдение в срединные месяцы сезонов.

На рис. 5 показаны суточные ходы концентраций CO , NO_2 и PM_{10} по расчетам ХТМ CHIMERE и параметра K , рассчитываемого как отношение концентрации «модель – наблюдение».

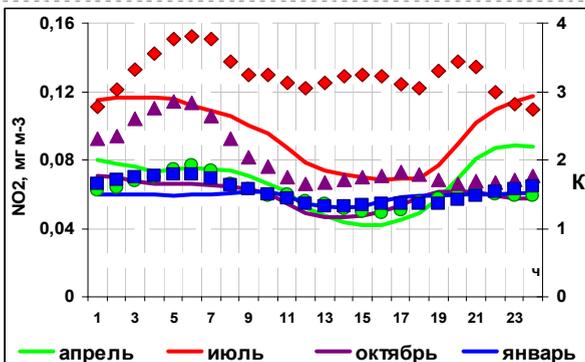
На рис. 5 а, где представлены результаты расчетов CO , видны сезонные различия модельного расчета суточного хода: практически без суточной амплитуды ход CO в январе, совпадающие по форме суточные ходы в апреле и июле со смещением на 0,2–0,3 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ летом в интервал больших величин и близкий к весеннему (за исключением последних четырех часов) суточный ход осенью. Заметим, что если зимний суточный ход CO по расчетам ХТМ резко отличается от наблюдающегося (рис. 1), то в другие сезоны модель в целом удовлетворительно воспроизводит вид суточного хода.

Особый интерес представляют внутрисуточные изменения погрешности модельного расчета, о которых можно судить по параметру K (чем K ближе к 1, тем точнее модельный прогноз). Первое, на что обращает внимание, это величины $K > 1$, указывающие на завышенные эмиссии CO в используемом ХТМ CHIMERE кадастре (EMEP). Также очевидно, что в ХТМ CHIMERE внутрисуточное распределение эмиссий отличается от характерного для Москвы режима выбросов CO : самые большие величины K приходятся на первую половину суток (зимой – на ночное время), они почти в 2 раза больше послеполуденных величин K . Нельзя не отметить, что самые большие величины K и, соответственно, наибольшие завышения эмиссий CO в июле.

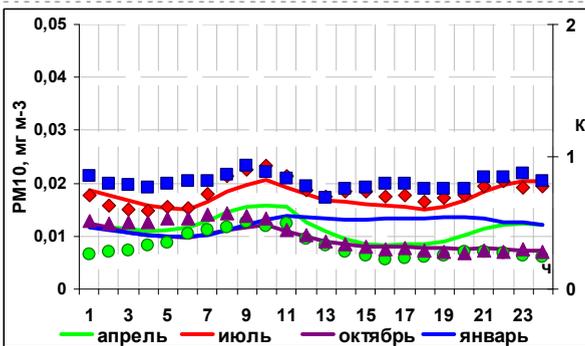
Модельные расчеты суточного хода NO_2 оказались более успешными. На рис. 5 б видны совпадающие зимой и осенью модельные расчеты суточного хода NO_2 со слабовыраженной суточной амплитудой и ночным максимумом. А по данным измерений в усредненном суточном ходе NO_2 в Москве в холодный сезон, концентрации диоксида азота ночью меньше дневных. Отметим, как и у CO , весной и летом формы модельного суточного хода NO_2 совпадают (в июле со смещением на 0,02–0,04 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ в интервал больших величин). Важно отметить, что рассчитываемый ХТМ суточный ход в теплый сезон по виду и суточной амплитуде совпадает с данными наблюдений (рис. 2).



а)



б)



в)

Рис. 5. Усредненный за месяц модельный суточный ход концентраций загрязняющих веществ, суточный ход параметра К (маркеры с соответствующим месяцу расчета цветом): CO (а), NO₂ (б), PM₁₀ (в), 2015 г.

Параметр K , так же как и у CO , в течение суток во все сезоны больше 1, т. е. ХТМ CHIMERE завывает концентрации NO_2 . Обращают на себя внимание (рис. 5 б) различающиеся по сезонам модельные погрешности с максимальными завывшениями NO_2 в июле (в 3 раза днем и почти до 4-х ночью) и наименьшими зимой и весной ($K = 1,3-1,8$). В суточном ходе модельных ошибок (как и CO) наблюдается тенденция увеличения их величин от дневных часов (минимум отклонений) к ночи с максимумом погрешностей во все сезоны в интервале 3–7 часов.

В отличие от газовых загрязнений, ХТМ CHIMERE систематически занижает уровень аэрозольного загрязнения воздуха в Москве, на что указывают величины параметра $K < 1$ (рис. 5 в). Выше отмечалось, что в среднем уровень PM_{10} в приземном воздухе мегаполиса невысокий и составляет примерно 0,3–0,5 ПДКс.с. (см. рис. 3). Установлено, что с самыми меньшими ошибками ХТМ CHIMERE воспроизводит утренний и вечерний максимумы PM_{10} (слабовыраженные по наблюдениям и в модельных расчетах), вполне удовлетворительно – суточный ход PM_{10} зимой и летом, а с самыми большими ошибками – осенью и весной. Отметим еще раз (рис. 3 б), что приземные концентрации PM_{10} в апреле самые большие в году, для этого месяца характерна значительная изменчивость СКО.

Коррекция модельных прогнозов

Выявленные на этапе верификации ХТМ характерные внутрисуточные погрешности модельных расчетов – мотивировка для проведения постобработки модельных расчетов с целью устранения систематической ошибки с пониманием того обстоятельства, что кроме неточности эмиссий на модельные ошибки влияют и другие факторы, среди них ошибки модельного прогноза метеорологических характеристик (в первую очередь температуры и скорости ветра в нижней тропосфере, а также влажности и осадков) в некоторых случаях могут оказывать большее влияние на конечный результат, чем неточность эмиссий. Такими случаями являются непредусмотренные моделью атмосферы НМУ или ошибочные (страховочные) прогнозы термической устойчивости и слабого ветра в атмосферном пограничном слое.

Установленные на данных модельного ряда и наблюдений в 2015 г. почасовые поправочные коэффициенты (параметр К) оценены с точки зрения эффективности их применения для постобработки ежедневных прогнозов с целью минимизации систематической погрешности. Проверка проводилась на независимой выборке весной 2016 г., ее результаты оказались весьма убедительными для осуществления коррекции модельных расчетов.

На рис. 6 демонстрируется усредненный за апрель модельный суточный ход CO с коррекцией и без нее, а также суточный ход CO по данным измерений на АСКЗА в модельной ячейке 11–19 (рис. 4). Следует признать несомненный положительный эффект применения статистической коррекции, которая обеспечила приближение модельных расчетов *средней за сутки концентрации CO* к наблюдавшейся, уменьшив ее с $0,977 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (без коррекции) до $0,579 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ при наблюдавшейся концентрации $0,51 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Модельные ошибки почасовых расчетов уменьшились с $0,4\text{--}0,6$ до $0,1\text{--}0,2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. При устранении систематического завышения ежечасных величин CO , благодаря коррекции, максимальный эффект получен в расчетах концентрации CO ночью и в вечерние часы.

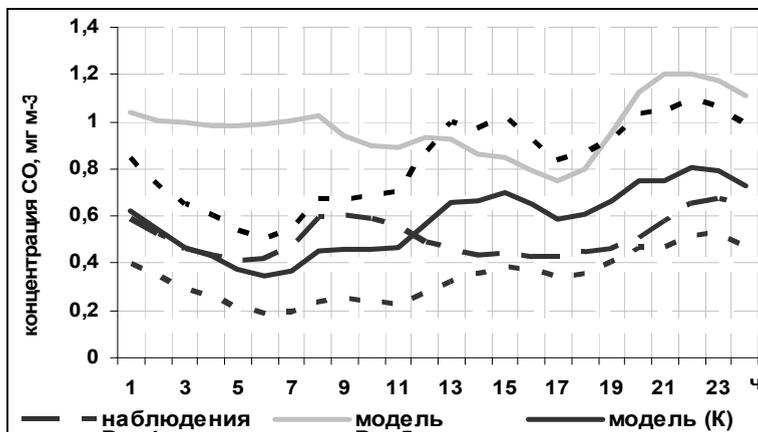


Рис. 6. Усредненный суточный ход измеренной на АСКЗА (10 станций) концентрации CO (наблюдения), модельных расчетов до коррекции (модель) и с ее учетом (модель К, штриховые линии – СКО). Апрель 2016 г.

Следует отметить и *относительную неудачу* коррекции в послеполуденные часы (в 14–17 ч); при позитивном снижении начального модельного уровня скорректированные расчеты имели *большую погрешность*, чем даже в часы вечернего максимума. Наиболее вероятной причиной этого, как показал анализ ежедневных модельных прогнозов СО, могли быть несколько ложных прогнозов, препятствующих очищению приземного воздуха атмосферных условий и, как следствие, страховочных прогнозов повышения уровня СО.

Эффективность постобработки модельных прогнозов весной 2016 года подтверждена анализом результатов статистической коррекции других загрязняющих веществ. Планируется продолжить тестирование на данных наблюдений в следующие сезоны.

Заключение

Созданная в Гидрометцентре России технология прогнозирования качества воздуха с применением химических транспортных моделей отечественных аналогов не имеет; сегодня она находится на этапе верификации численных расчетов по данным автоматизированных измерений концентраций загрязняющих веществ. Регулярные сравнения модельных расчетов и наблюдаемых концентраций позволили выявить характерные для приоритетных загрязнителей воздуха модельные погрешности, обусловленные двумя главными факторами – неточностью эмиссий используемых кадастров и ошибками прогнозов метеорологических параметров.

Предложен способ постобработки модельных расчетов с применением статистической коррекции почасовых расчетов концентраций загрязняющих веществ. Его проверка на независимой выборке (весна 2016 года) показала эффективность и целесообразность применений в оперативной технологии.

В развитии технологии прогнозирования качества воздуха на основе ХТМ предполагается провести тестирование разных способов статистической коррекции для повышения точности численных прогнозов приземных концентраций загрязняющих веществ.

Выражаем благодарность ГПБУ «Мосэкомониторинг», Департаменту природопользования и охраны окружающей среды

Правительства Москвы за сотрудничество в области развития технологии прогнозирования качества воздуха и предоставление данных о загрязнении.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №14-05-00481.

Список использованных источников

1. Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Лапченко В.А. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в Московском регионе // Биосфера. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 339–351.

2. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.

3. Глазкова А.А., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Семутникова Е.Г. Суточный ход концентрации аэрозоля (PM₁₀) летом в Московском регионе // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 6. – С. 495–500.

4. ГН 2.1.6.1338-03. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

5. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В. и др. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Изв. РАН. ФАО. – 2006. – Т. 42. – С. 176–190.

6. Донченко В.В., Кунин Ю.И., Рузский А.В., Виженский В.А. Методы расчета выбросов от автотранспорта и результаты их применения // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – № 3. – С. 44–51.

7. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б. и др. Закономерности изменчивости концентраций малых газовых составляющих в приземном воздухе г. Москвы // Известия РАН. ФАО. – 2007. – Т. 43. – С. 219–231.

8. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В. и др. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Известия РАН. ФАО. – 2015. – Т. 51. – С. 39–51.

9. Заритов Р.Б., Коновалов И.Б., Глазкова А.А. Расчет концентраций загрязняющих веществ с использованием модели атмосферы WRF-ARW и химико-транспортной модели CHIMERE // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 12. – С. 52–67.

10. *Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю.* Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в Лондоне // *Оптика атмосферы и океана.* – 2014. – Т. 27, № 5. – С. 424–434.
11. *Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Глазкова А.А., Нахаев М.И., Зарипов Р.Б., Лезина Е.А., Звягинцев А.М.* Наблюдаемая и рассчитанная изменчивость концентраций взвешенного вещества в Москве и Зеленограде // *Метеорология и гидрология.* – 2011. – № 3. – С. 48–60.
12. *Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю.* и др. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // *Оптика атмосферы и океана.* – 2014. – Т. 27. – С. 473–482.
13. *Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И.* и др. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // *Труды Гидрометцентра России.* – 2014. – Вып. 351. – С. 154–172.
14. *Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Блинов Д.В., Лезина Е.А.* Экспериментальные расчеты концентраций PM_{10} и CO комплексом моделей CHIMERE и COSMO-Ru7 // *Оптика атмосферы и океана.* – 2015. – Т. 28, № 6. – С. 569–578.
15. *Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Блинов Д.В.* Прогнозирование концентраций загрязняющих веществ в атмосфере с применением химической транспортной модели CHIMERE и модели COSMO-Ru7 // *Труды Гидрометцентра России.* – 2015. – Вып. 357. – С. 146–164.
16. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные. 2005 год. – Женева: ВМО, 2006.
17. *Суркова Г.В., Курсанов А.А., Кислов А.В., Ревокатова А.П., Ривин Г.С.* Прогноз концентрации загрязняющих веществ с помощью объединенной модели COSMO-Ru7-ART // *Труды Гидрометцентра России.* – 2014. – № 352. – С. 115–138.
18. CHIMERE chemistry – transport model. – <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>, Institut Pierre Simon Laplace, 2001–2014.
19. *Gorchakov G., Semoutnikova E., Karpov A., Lezina E.* Air Pollution in Moscow Megacity // *Advanced topics in environmental health and air pollution case studies.* Intech. – 2011. – P. 211–236. – <http://www.intechopen.com>.
20. *Kukkonen J., Olsson T., Schultz D. M., Baklanov A. et al.* A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* – 2012. – Vol. 12. – P. 1–87.

21. *Makra L., Mayer H., Mika J., Sánta T., Holst J.* Variations of traffic related air pollution on different time scales in Szeged, Hungary and Freiburg, Germany // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2010. – Vol. 35. – P. 85–94.

22. *Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al.* CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling // *Geosci. Model Dev.* – 2013. – Vol. 6. – P. 981–1028.

23. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G.* A Description of the advanced research WRF Version 3, NCAR Tech. Notes–475+STR. – Boulder, Colorado, USA, 2008. – 113 p.

24. *Yang K.-L.* Spatial and seasonal variation of PM10 mass concentrations in Taiwan // *Atmos. Environ.* – 2002. – Vol. 36. – P. 3403–3411.

Поступила в редакцию 31.05.2016 г.

ОЗОНОВАЯ «МИНИ-ДЫРА» НАД СЕВЕРОМ УРАЛА И СИБИРИ

*М.П. Никифорова¹, П.Н. Варгин², А.М. Звягинцев²,
Н.С. Иванова², И.Н. Кузнецова³, А.Н. Лукьянов²*

*¹Севастопольский экономико-гуманитарный институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»;*

²Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный;

*³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

*nikiforovamp@yandex.ru, vargin@mail.ru, zvyagintsev45@yandex.ru,
oom@cao-rhms.ru, muza@mecom.ru, lukyanov@caomsk.mipt.ru*

Озон является важнейшей газовой составляющей атмосферы, поскольку является участником многих циклов атмосферной химии и защищает Землю от жесткого губительного солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения [6]. Важнейшей характеристикой озона является его общее содержание в атмосфере (ОСО), влияющее на УФ облученность земной поверхности: чем меньше ОСО, тем больше ультрафиолета достигает поверхности. ОСО измеряют в единицах Добсона (е.Д.) – 1 е.Д. соответствует приведенной (при нормальных условиях) толщине слоя озона 0,01 мм. В среднем по Земле ОСО составляет около 300 е.Д.; ОСО очень изменчиво в пространстве и времени и связано с величиной потока солнечной радиации, атмосферным переносом и (фото-) химическими процессами.

Согласно существующей терминологии [2, 8, 14], озоновой «мини-дырой» (ОМД) называют область, общее содержание озона (ОСО) над которой меньше 220 е.Д. (критерий идентификации антарктической «озоновой дыры»), с продолжительностью существования до 1 недели (у «озоновой дыры» – более 1 мес) и

площадью до 3 млн км² (у «озоновой дыры» – более 10 млн км²). Кроме приведенных характеристик, существенно различаются также и причины возникновения «озоновой дыры», наблюдаемой в полярных областях Южного полушария, и эпизодов ОМД, наиболее характерных для внетропических широт Северного полушария.

Антарктическая "озоновая дыра" формируется с августа по ноябрь-декабрь в результате разрушения озона в гетерогенных реакциях на полярных стратосферных облаках (ПСО), в условиях устойчивого циркумполярного вихря (ЦПВ) [10, 18–20]. Во внетропических широтах Северного полушария осенью (в период, когда наблюдается сезонный минимум ОСО) в отдельные годы могут возникать области аномально низких значений ОСО синоптического масштаба, которые классифицируются как ОМД. Такие явления наиболее часто возникают над Северной Атлантикой и перемещаются с зональными потоками на восток, иногда доходя до северных районов Сибири [5, 7, 8]. Причинами их формирования являются аномалии крупномасштабных атмосферных процессов [15, 17, 22]. Самые глубокие озоновые «мини-дыры» образуются в стратосферном циклоне над высоким и теплым тропосферным антициклоном [11, 12].

В период инструментальных наблюдений в первые месяцы года над территорией России существенные отрицательные аномалии ОСО наблюдались в 1995–1997, 2000, 2005, 2011 гг., причем интенсивность аномалий нарастала к марту-апрелю [1, 3]. Однако ни в один из указанных годов ОСО на российских станциях не опускалось ниже 230 е.Д. В 2016 г. в конце января на станциях отечественной наземной озонометрической сети над севером Урала и Сибири впервые зафиксированы значения ОСО, меньшие 220 е.Д., т. е. ОМД. В настоящей работе приведены характеристики этой ОМД, рассмотрена динамика значений ОСО и различных метеоэлементов в эпизоде, а также обсуждены возможные причины и факторы возникновения аномально низкого уровня ОСО.

Особенности ОСО зимой 2015/2016 гг.

Средний многолетний сезонный ход ОСО во внетропических широтах Северного полушария имеет минимум в сентябре,

а максимум в марте-апреле [6]. В конце января 2016 г. над северными районами Урала и Сибири на четырех станциях российской озонотрической сети (Печора, 65° с. ш., 57° в. д.; Ханты-Мансийск, 61° с. ш., 69° в. д.; Туруханск, 66° с. ш., 88° в. д.; Тура, 64° с. ш., 100° в. д.) зафиксированы значения ОСО меньше 220 е.Д., что на 40–45 % меньше средних многолетних (рис. 1).

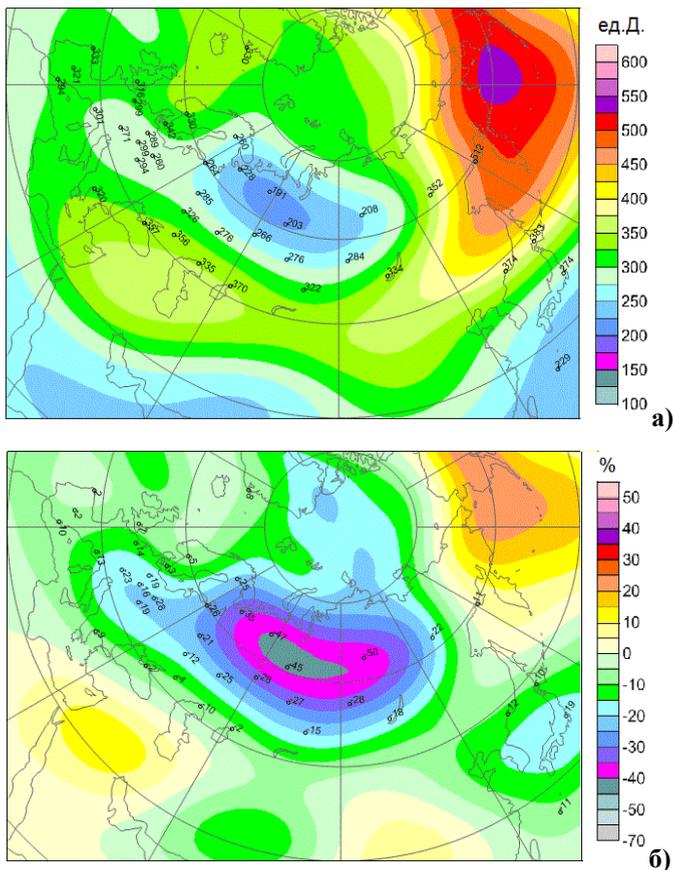


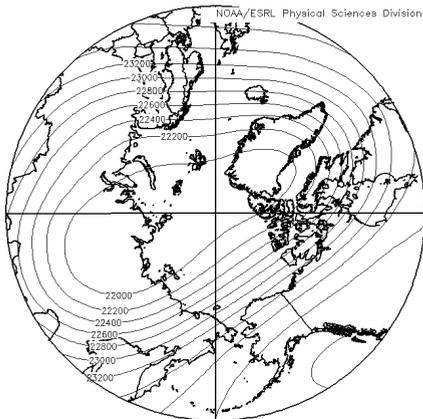
Рис. 1. ОСО (а) и его отклонения от нормы (б) 28 января 2016 г. по спутниковым данным WOUDC [http://woudc.org/], числа на карте – измерения ОСО на станциях озонотрической сети.

Столь значительное уменьшение ОСО подтверждалось и данными измерений ОСО с помощью инструмента OMI со спутника AURA (США). За всю историю инструментальных наблюдений (с 1973 г.) никогда прежде эпизодов ОМД в первую половину года над территорией России не наблюдалось, хотя значительные озонные аномалии над территорией России регистрировались в отдельные годы в период февраль-апрель [1, 3, 9, 13]: дефицит ОСО достигал 50 % (от нормы), но ОСО оставалось больше 220 е.Д.

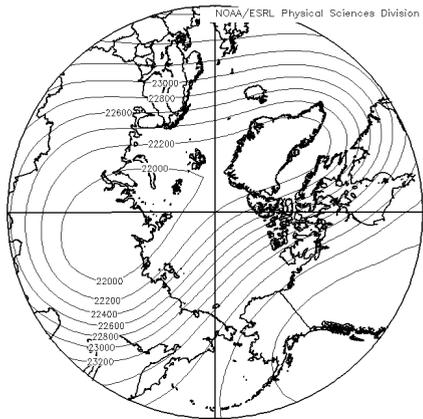
Заметные отклонения ОСО от «климатической» нормы, которая определяется как среднее за период 1973–1984 гг., начали наблюдаться уже в начале зимы 2015/2016 гг., в основном в высоких широтах Северного полушария. Над российским сектором Арктики в декабре 2015 г. временами отмечалось уменьшение ОСО почти до 250 е.Д., что соответствует дефициту 20–30 % от нормы.

Первые признаки возникновения «мини-дыры» над территорией России появились в последней неделе января. В эти дни большая ось имевшего вид эллипса стратосферного циклона, практически не меняя околополюсного положения, вместе с соответствующими ей ложбинами, распространившимися на Сибирь и Гренландию, разворачивалась на восток. Вращение циркумполярного вихря сопровождалось активными динамическими процессами в центре ЦПВ, а именно раздвоением центра и смещением вертикальной оси. Как видно на рис. 2, уже 27 января над Таймыром локализовался замкнутый минимум геопотенциала (показана поверхность 30 гПа). На следующий день он еще сохранялся, но над Гренландией начал формироваться второй барический минимум, который, продолжая углубляться и расширяться по площади, расположился между Гренландией и Скандинавским полуостровом.

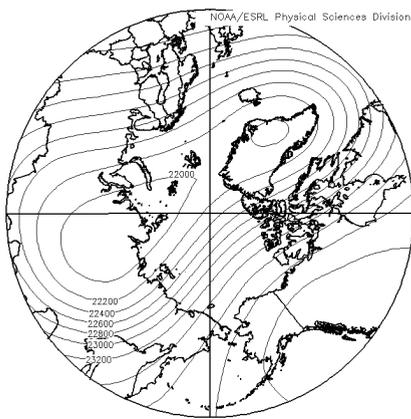
Именно в период изоляции центра ЦПВ над Таймыром (27–29 января) на северных станциях российской озонметрической сети зафиксировано резкое уменьшение ОСО, на станциях Печера и Ханты-Мансийск 28 января ОСО уменьшалось до 190–200 е.Д. (рис. 1, рис. 3). Измерения ОСО с помощью озонметров М-124 на станциях Туруханск и Тура также регистрировали значительное уменьшение ОСО (до 220 е.Д.).



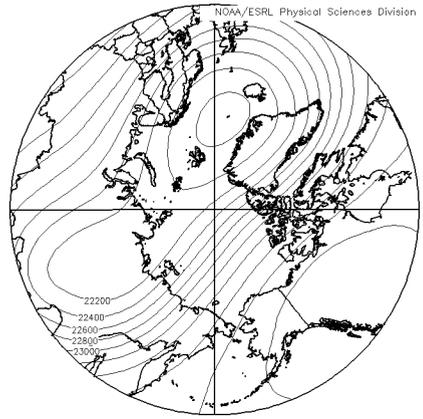
25 января



27 января



28 января



30 января

Рис. 2. Конфигурация циркумполярного стратосферного вихря, карты геопотенциальной высоты 30 гПа (гп. м). Реанализ NCEP/NCAR, 25–30 января 2016 г.

Площадь с аномально низким ОСО составила почти 3 млн км² (рис. 1). В период максимального развития ОМД содержание озона в столбе атмосферы составляло около половины нормы.

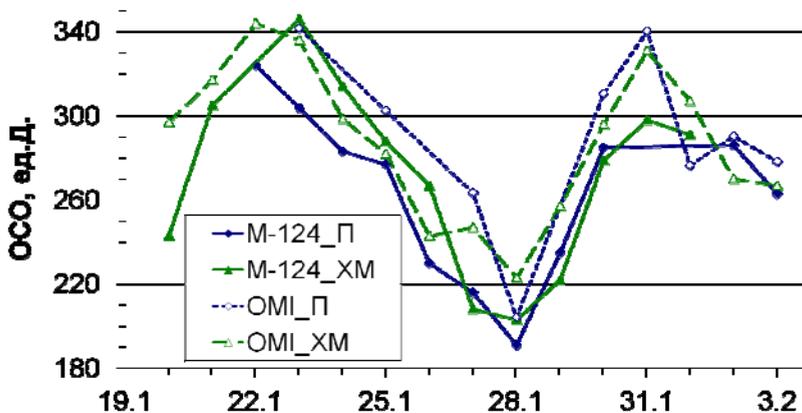


Рис. 3. ОСО по данным измерений с помощью наземного озонметра М-124 и инструмента ОМІ на спутнике АURA на станциях Печора (П) и Ханты-Мансийск (ХМ) в период 20 января – 3 февраля 2016 г.

Над российским севером и Сибирью ОМД существовала несколько дней. По-видимому, локализация минимума на Таймыром сопровождалась интенсивными восходящими движениями в нижней стратосфере, изоляцией холодного воздуха в центральной части ЦПВ. 1 февраля признаков ОМД уже не было, но ОСО над этой территорией по-прежнему оставалось меньше климатической нормы на 20–30 %. Исчезновение ОМД над российской территорией совпало с усилением стратосферного антициклона с центром Аляска – запад Канады и стратосферным потеплением, признаки начала которого обнаруживались уже 26 января в повышении температуры над севером Тихого океана, Чукоткой и Аляской.

Отличительными особенностями ЦПВ в начале 2016 г. стало то, что внутри него в диапазоне высот 15–30 км отмечалась экстремально низкая температура; область температуры $-80 \dots -90 \text{ }^\circ\text{C}$ (и ниже) была смещена в полярные широты Западного полушария и на север Евразийского материка, охватив большую часть Урала и Сибири. Отрицательные отклонения температуры от

нормы достигли на 10 гПа 30 К, на 50 гПа 20 К. На рис. 4 показаны поля геопотенциальной высоты и температуры на изобарической поверхности 30 гПа в день максимального углубления ОМД над российскими регионами.

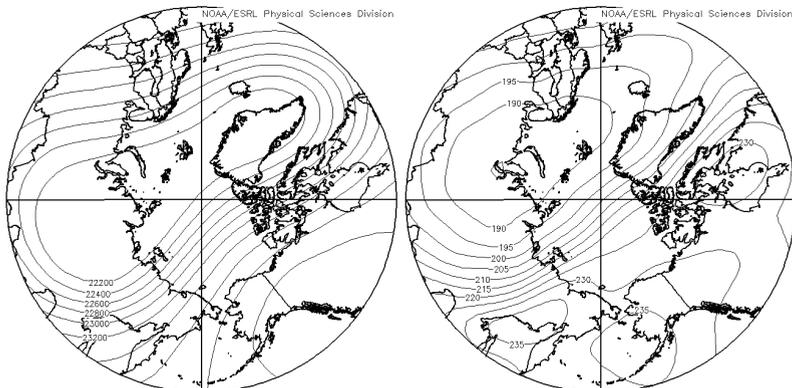


Рис. 4. Распределение геопотенциальной высоты (м; слева) и температуры (К; справа) на изобарической поверхности 30 гПа 28 января 2016 г. (по данным [25]).

О причинах образования озоновой «мини-дыры»

Дефицит ОСО в зимне-весенний период над северными областями России наблюдался в отдельные предыдущие годы в условиях малоподвижного глубокого ЦПВ. В эпизодах значительного дефицита ОСО температура внутри ЦПВ опускалась ниже $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ – порога образования полярных стратосферных облаков (ПСО), гетерогенные реакции на которых, в т. ч. с хлорсодержащими соединениями, ответственны за разрушение стратосферного озона [18].

Для справки: ПСО образуют частицы в разном агрегатном состоянии и разного композиционного состава; по этим характеристикам ПСО классифицируют на два типа. Частицы I типа ПСО образуются при температуре от 195 до 188 К (от -78 до $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$), частицы ПСО II типа – это кристаллики льда, образующиеся при температуре $\sim 188\text{ К}$ ($-85\text{ }^{\circ}\text{C}$) и ниже.

Зимой 2015/2016 гг., по данным NASA, США [22], в стратосфере над Арктикой зафиксированы рекордно низкие температуры (рис. 5 а), что способствовало возникновению большого количества ПСО I и даже II типа (на рис. 5 а зеленым цветом обозначены пороговые уровни их образования). Площадь ПСО к концу января 2016 г. достигла 17 млн км² (рис. 5 б) – это рекордное значение за всю историю инструментальных наблюдений.

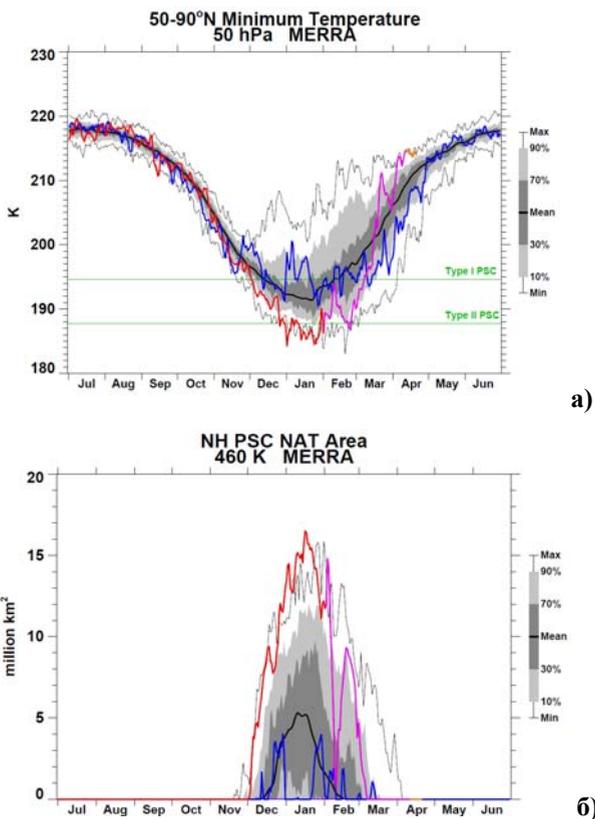


Рис. 5. Минимальная температура в широтном поясе 50–90° с. ш. на изобарической поверхности 50 гПа (а) и общая площадь полярных стратосферных облаков над Арктикой в 2015/2016 гг. (б) [22]. Черная линия – среднее за период 1978–2015 гг., синяя – зима 2014/2015 гг., красная-лиловая – зима 2015/2016 гг.

Аномально холодная нижняя стратосфера стала причиной значительных отклонений вертикальной стратификации температуры от «климатического» профиля. В первую очередь это касается слоя «термической» тропопаузы, которая на некоторое время практически исчезала. На рис. 6 показаны вертикальные профили температуры внутри зоны экстремального понижения температуры в ЦПВ на ст. Салехард (66° с. ш., 66° в. д.) до появления ОМД, в период ее существования и после исчезновения [23].

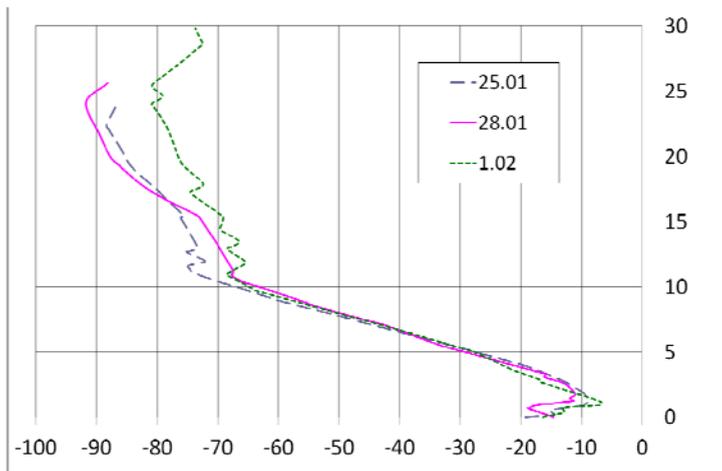


Рис. 6. Вертикальные профили температуры на ст. Салехард (66° с. ш., 66° в. д.) по результатам радиозондирования 0 ч ВСВ 25, 28 января и 1 февраля 2016 г. Вертикальная шкала – высота (км), ось x – температура ($^{\circ}\text{C}$).

Отметим, что тропопауза, обычно располагаясь на высотах 8–10 км, в период ОМД имела лишь формальные признаки. Явное повышение температуры с высотой, как указывают данные радиозондирования, отмечалось выше 25 км. Такая ситуация часто наблюдается при интенсификации явлений стратосферно-тропосферного обмена [4, 16], когда тропопауза, согласно ее классическому (термическому) определению, перестает четко выделяться на вертикальных температурных профилях (например, наблюдается «множественность» или «размытость» тропопаузы).

Отсутствие явной «термической» тропопаузы до высоты 20 км может свидетельствовать о том, что в формировании эпизода ОМД в начале 2016 г. определенную роль сыграли вертикальные движения [16]. Отметим также, что, согласно [21], в январе 2016 г. экваториальная поверхность 350 К располагалась выше по сравнению со средним многолетним положением (1979–2015 гг.), наибольший подъем совпал с эпизодом ОМД.

Исчезновение озоновой «мини-дыры» над территорией России, по-видимому, связано с минорным внезапным стратосферным потеплением, которое началось в последние дни января и достигло максимума к 9 февраля 2016 г. [21]. Оно же привело к быстрому сокращению общей площади полярных стратосферных облаков и восстановлению близкого к сезонной норме поля ОСО.

Образование зимой 2015/2016 гг. устойчивых областей значительного дефицита ОСО, изоляция и сильное углубление ЦПВ также сопровождалось заметными аномалиями ряда гидрометеорологических явлений:

- западной фазой квазидвухлетнего колебания, при которой ОСО меньше нормы на 6–8 % и более [1], что подтверждается событиями с образованием значительных отрицательных аномалий ОСО над северными районами России в 1995, 2005 и 2011 гг.;

- малой волновой активностью тропосферы зимой 2016 г., а также ослаблением среднезонального (45–75° с. ш.) потока тепла; с начала декабря 2015 г. этот поток тепла был меньше среднего многолетнего значения, только в конце января наметилась тенденция к его росту [21];

- максимальным за последние почти 70 лет (с 1948 г.) значением индекса Южного колебания в январе 2016 г. [24];

- активной фазой Эль-Ниньо. Положительная аномалия среднемесячной температуры поверхности Тихого океана в экваториальных широтах составила 2–3 °С [26]. Зимой 2016 г. положительные аномалии зафиксированы и в других акваториях Мирового океана, в т. ч. в Гольфстриме и Мексиканском заливе, где температура поверхности воды выше нормы на 1–2 °С, теплее обычного было в Норвежском и Баренцевом морях [26]. Другого знака отрицательная аномалия температуры морской поверхности уже длительное время наблюдается к югу от Гренландии;

– при аномально холодной нижней стратосфере на большей части России наблюдалась аномально теплая зима: средняя температура превысила климатическую норму на 4–5 °С, в Сибири, на Таймыре и Ямале на 7–8 °С, на арктических островах в Баренцевом и Карском морях на 10–12 °С. Отдельно отметим, в январе на Таймыре и в Якутии аномалии среднемесячной температуры достигли +12 ...14 °С, на островах в Карском море температура воздуха оказалась выше нормы почти на +17 °С (о. Визе). Никогда ранее аномалии не были столь большими. Исключение составил крайний восток страны, где зима оказалась холоднее нормы на 1–3 °С. Самой теплой в истории наблюдений стала зима 2015–2016 гг. также в США, Европе и Арктике [26].

И хотя сегодня не представляется возможным оценить взаимное влияние или взаимодействие процессов в стратосфере и обусловивших погодные аномалии процессов в нижней тропосфере, совпадение экстремальных событий, возможно, в какой-то мере отражает механизм взаимодействия, нуждающийся, как и проблема динамики ОСО, в глубоком изучении.

Заключение

За время наблюдений с 1973 года в конце января 2016 г. впервые над севером Урала и Сибири зарегистрирована озоновая «мини-дыра»; ее появление, по-видимому, обусловлено динамическими и химическими процессами в глубоком малоподвижном циркумполярном вихре. Образование обширной области озонового минимума и длительного сохранения дефицита ОСО (до 20–40 %) в околополярных районах и над территорией России сопровождалось интенсификацией стратосферно-тропосферного обмена, западной фазой квазидвухлетнего колебания, а также активной фазой Эль-Ниньо. В области циркумполярного стратосферного вихря в нижней стратосфере наблюдалась экстремально низкая температура (-80 ...-90 °С), рекордно большим было и количество полярных стратосферных облаков.

Образование первой в истории наблюдений озоновой «мини-дыры» во внетропических широтах Северного полушария в январе 2016 года, как и эпизодов крупных озоновых аномалий в

последние годы свидетельствует, что причины и механизмы эволюции озонового слоя сегодня изучены недостаточно и их еще предстоит установить.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-35-50114 мол_нр.

Список использованных источников

1. Божков Р.Д., Фиолетов В.Э., Кадыгрова Т.В., Ромашикина К.И., Шаламянский А.М. Оценка уменьшения озона над Европой в 1973–1995 гг. на основе откорректированных данных наблюдений фильтровых озонметров // *Метеорология и гидрология*. – 1995. – № 9. – С. 30–40.
2. Большая Российская энциклопедия. Том 23. – М.: БРЭ, 2013. – 768 с.
3. Звягинцев А.М., Кузнецов Г.И., Кузнецова И.Н. Весенние аномалии озонового слоя над Россией // *Метеорология и гидрология*. – 2013. – № 5. – С. 5–13.
4. Иванова А.Р. Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // *Метеорология и гидрология*. – 2016. – № 3. – С. 22–45.
5. Лукьянова Н.Ф., Людчик А.М. Статистика аномальных явлений в озоносфере над Европой // *Метеорология и гидрология*. – 2008. – № 8. – С. 37–48.
6. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 288 с.
7. Balis D.S. An update on the dynamically induced episodes of extreme low ozone values over the northern middle latitudes // *Int. J. Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 32, No. 24. – P. 9197–9205.
8. Bojkov R.D., Balis D.S. Characteristics of episodes with extremely low ozone values in the northern middle latitudes 1957–2000 // *Ann. Geophys.* – 2001. – Vol. 19. – P. 797–807.
9. Garcia R.R. Atmospheric science: An Arctic ozone hole? // *Nature*. – 2011. – Vol. 478. – P. 462–463.
10. Hartmann D.L., Watson R.T. Observations and theories related to antarctic ozone changes // Report of the International Ozone Trends Panel 1988. Chapter 11. WMO Report No. 18. – 1988. – P. 665–750.
11. Hommel R., Eichmann K.-U., Aschmann J., Bramstedt K., Weber M., von Savigny C., Rich-ter A., Rozanov A., Wittrock F., Khosrawi F., Bauer R.,

Burrows J.P. Chemical ozone loss and ozone mini-hole event during the Arctic winter 2010/2011 as observed by SCIAMA-CHY and GOME-2 // Atmos. Chem. Phys. – 2014. – Vol. 14. – P. 3247–3276.

12. James P.M., Peters D. The Lagrangian structure of ozone mini-holes and potential vorticity anomalies in the Northern Hemisphere // Ann. Geophys. – 2002. – Vol. 20. – P. 835–846.

13. Manney G.L., Santee M.L., Rex M., Livesey N.J. et al. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // Nature. – 2011. – Vol. 478. – P. 469–475.

14. Newman P.A., Lait L.R., Schoeberl M.R. The morphology and meteorology of Southern Hemisphere spring total ozone mini-holes // Geophys. Res. Lett. – 1988. – Vol. 15. – P. 923–926.

15. Orsolini Y.J., Limpasuvan V. The North Atlantic Oscillation and the occurrences of ozone mini-holes // Geophys. Res. Lett. – 2001. – Vol. 20, No. 21. – P. 4099–4102.

16. Pan L.L., Randel W.J., Gille J.C., Hall W.D., Nardi B., Massie S., Yudin V., Khosravi R., Konopka P., Tarasick D. Tropospheric intrusions associated with the secondary tropopause // J. Geophys. Res. – 2009. – Vol. 114. – D10302. – doi: 10.1029/2008JD011374.

17. Peters D., Egger J., Entzian G. Dynamical aspects of ozone mini-hole formation // Meteorol. Atmos. Phys. – 1995. – Vol. 55. – P. 205–214.

18. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // Rev. Geophys. – 1999. – Vol. 37. – P. 275–316.

19. Solomon S., Portman R.W., Thompson D.W.J. Contrasts between Antarctic and Arctic ozone depletion // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2007. – Vol. 104. – No. 2. – P. 445–449.

20. Solomon S., Haskins J., Ivy D.J., Min F. Fundamental differences between Arctic and Antarctic ozone depletion // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2014. – Vol. 111, No. 17. – P. 6220–6225.

21. WMO Arctic ozone bulletin 2016
(<https://www.wmo.int/pages/prog/arep/>)

22. <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

23. <http://weather.uwyo.edu/upperair/>

24. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>

25. <http://www.esrl.noaa.gov/>

26. <http://www.meteoinfo.ru/climate/>

Поступила в редакцию 14.06.2016 г.

АННОТАЦИИ

УДК 551.583

Низкочастотные изменения атмосферного давления и приповерхностной температуры воздуха во внетропических широтах Северного полушария / Переведенцев Ю.П., Вильфанд Р.М., Шанталинский К.М. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 5–25.

Рассматриваются пространственно-временные изменения полей атмосферного давления и приповерхностной температуры воздуха во внетропических широтах Северного полушария в период 1900–2014 гг.

Для оценки перестройки в полях метеовеличин в широтной зоне 20–90° с. ш. определялись разности полей атмосферного давления и приповерхностной температуры, осредненных по следующим временным интервалам: для давления 1900–1929, 1930–1959, 1960–1987, 1988–2000 гг., для температуры 1900–1929, 1930–1959, 1960–1987, 1988–2000, 1988–2014 гг. Степень схождения между полученными разностными картами устанавливалась с помощью критерия аналогичности. Выявилось, что наибольшее схождение между разностными полями отмечается в двух соседних периодах 1988–2000 и 1988–2014 гг. Рассмотрен многолетний ход низкочастотной компоненты температуры воздуха и атмосферного давления в центрах действия атмосферы и в Приволжском федеральном округе. Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим внетропических широт исследовалось с использованием метода композитов.

Ключевые слова: атмосферное давление, температура воздуха, разности средних значений, центры действия атмосферы, низкочастотная компонента, метод композитов.

Табл. 2. Ил. 7. Библ. 24.

УДК 551.811+633.1(470.3)

Оценка агрометеорологических показателей условий зимовки озимых зерновых культур в центральных черноземных областях в условиях климатических изменений / Тарасова Л.Л. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 26–44.

Исследована динамика условий зимовки озимых зерновых культур (минимальной за зиму температуры почвы на глубине узла кушения озимых (3 см), высоты и продолжительности залегания снежного покрова), а также показателя суровости зимы и площадей с плохим состоянием посевов весной с 1964 по 2012 г. в центральных черноземных областях. На современном материале построены новые зависимости процента площадей с плохим состоянием посевов весной от минимальной за зиму температуры почвы на глубине узла кушения озимых.

Показано, что в целом современные изменения положительно сказываются на сохранности посевов озимых культур. Наблюдаемые изменения климата почвы зимой и режима снежного покрова приближают условия для зимовки озимых к оптимальным.

Ключевые слова: условия зимовки озимых зерновых культур, процент площадей с плохим состоянием посевов весной, климат почвы, снежный покров, показатель суровости зимы.

Табл. 2. Ил. 6. Библ. 20.

УДК 551.5:632.112:633.1

О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур / Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 45–78.

Приведены результаты исследований термического режима в вегетационный и зимний период на Европейской территории России. Показано изменение вероятности сильных засух в период сева и начала вегетации озимых зерновых культур осенью. Выявлено различие влияния глобального потепления климата на перезимовку озимых в районах вымерзания и выпревания. Исследованы условия увлажнения в период формирования урожая основных зерновых культур и их динамика за многолетний период. Показаны риски засух в мае-июне и значительного недобора урожая озимой и яровой пшеницы.

Ключевые слова: изменение климата, агроклиматические показатели, риски, атмосферная засуха, урожайность, условия сева, условия зимовки озимых культур, адаптация.

Табл. 6. Ил. 13. Библ. 16.

УДК 502.3

Влагосодержание и влагоперенос в тропосфере Причерноморского региона в теплое полугодие / Данова Т.Е., Прокофьев О.М. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 79–94.

Представлены результаты исследования элементов влагообмена Причерноморского региона. В теплый период года в тропосфере формируется «река влаги», образование которой связано с северо-западным переносом в регионе. Максимум влагосодержания над западным побережьем Черного моря обусловлен траекториями южных циклонов. Интерпретация спектральной плотности исследуемых величин как их «энергетического спектра» позволила охарактеризовать зону активности в восточной части Черного моря как зону активного циклогенеза. Показано значительное снижение количества влаги, циркулирующей в регионе.

Ключевые слова: влагосодержание, влагоперенос, спектральная плотность, траектории циклонов, циклогенез.

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 25.

УДК 556.06

Оценка применимости модели динамики снежного покрова SNOW-17 в практике оперативного гидрологического прогнозирования в России / Симонов Ю.А., Ликарь Э.-Л.Д., Фролова Н.Л. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып 360. – С. 95–112.

Моделирование динамики снежного покрова является неотъемлемой составляющей схем расчета стока рек с наличием снегового питания. В настоящее время оперативная гидрологическая информация, доступная в режиме реального времени, весьма ограничена, что предъявляет свои требования к структуре моделей формирования стока и, соответственно, требуемой входной информации. В статье представлены результаты исследования возможности применения модели динамики снежного покрова SNOW-17 в практике оперативного гидрологического прогнозирования. Одним из преимуществ данной модели с точки зрения потенциального использования в оперативной практике является ее сбалансированная структура, которая позволяет производить расчет основных характеристик снежного покрова при минимальных информационных требованиях – в качестве входных данных требуются значения температуры воздуха и осадков. Для оценки применимости выбран небольшой водосбор Европейской территории России. Первичные результаты с использованием рекомендуемых параметров модели позволяют сделать вывод о том, что модель может быть использована в дальнейшем в качестве расчетной составляющей схематизации процесса формирования стока с дальнейшим использованием в оперативном гидрологическом прогнозировании на реках Российской Федерации.

Ключевые слова: снежный покров, моделирование, прогнозы речного стока.

Табл. 3. Ил. 6. Библ. 16.

УДК 551.50

Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации Глобального аэронавигационного плана (ГАНП) / Иванова А.Р., Шакина Н.П. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 113–134.

Работа посвящена особенностям прогнозирования погоды, представляющей интерес для авиации, на коротких масштабах времени. Описан временной интервал спектра действия авиационных прогнозов. Дано понятие наукастинга и обоснована необходимость его применения для авиационного прогноза. Приведено описание некоторых локальных и универсальных систем наукастинга, используемых для метеорологического обеспечения авиации в различных странах. Изложены основные задачи и цели авиационного исследовательского демонстрационного проекта по наукастингу, организованного в рамках реализации ГАНП (Глобального аэронавигационного плана).

Ключевые слова: метеорологическое обеспечение аэронавигации, численный прогноз погоды, системы наукастинга для авиации, Глобальный аэронавигационный план, исследовательский проект по авиационному наукастингу.

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 23.

УДК 551.501.815

Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации / Алексеева А.А., Песков Б.Е. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 135–148.

Представлены проведенные в Гидрометцентре России разработки для практического применения данных радиолокационных измерений (МРЛ и ДМРЛ) при диагностике некоторых характеристик осадков и града. Предложен способ определения интенсивности и количества выпавших осадков, основанный на учете рассчитанной максимальной конвективной скорости и скорости перемещения радиоэха. Подробно излагается метод диагностики выпадения града на подстилающую поверхность по данным радиолокационных измерений.

Ключевые слова: максимальная конвективная скорость, интенсивность и количество осадков, град, диагностика по радиолокационной информации.

Табл. 3. Ил. 1. Библ. 15.

УДК 551.510.42.001.572

Суточный ход загрязняющих воздух веществ по измерениям и расчетам химической транспортной модели / Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Коновалов И.Б., Березин Е.В. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 149–167.

Созданная в Гидрометцентре России технология прогнозирования качества воздуха с применением химических транспортных моделей находится на этапе верификации численных расчетов по данным автоматизированных измерений концентраций загрязняющих веществ. Регулярные сравнения модельных и наблюдаемых в Москве приземных концентраций (средних и максимальных за сутки), а также их суточного хода позволили выявить характерные для отдельных загрязняющих веществ ошибки расчетов, обусловленные, в основном, неточностью эмиссий используемых кадастров и ошибками прогнозов метеорологических параметров. Предложен способ постобработки модельных расчетов с применением статистической коррекции почасовых расчетов концентраций. Тестирование на независимой выборке показало эффективность и целесообразность применения коррекции в оперативной технологии прогнозирования качества воздуха в Московском регионе.

Ключевые слова: моделирование загрязнения атмосферы, химическая транспортная модель CHIMERE, суточный ход загрязняющих веществ.

Табл. 1. Ил. 6. Библ. 24.

УДК 551.510.413.2

Озоновая «мини-дыра» над севером Урала и Сибири / Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лукьянов А.Н. // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 168–180.

Впервые за всю историю наземных и спутниковых наблюдений (с 1970-х гг.) над севером Урала и Сибири в конце января 2016 года наблюдалась озоновая «мини-дыра»: общее содержание озона (ОСО) здесь опускалось до величины 190–220 е.Д. Необычно низкие значения ОСО наблюдались как по данным станций российской озонметрической сети, так и аппаратуры OMI на спутнике AURA, США. Приведены иллюстрации динамики ОСО и различных влияющих на озон метеорологических параметров; обсуждены возможные причины и факторы аномального уменьшения ОСО.

Ключевые слова: эпизод озоновой «мини-дыры» над Арктикой, состав стратосферы, динамика средней атмосферы.

Ил. 6. Библ. 26.

SUMMARIES

Low-frequency changes of atmosphere pressure and surface air temperature in the non-tropical latitudes of the Northern Hemisphere / Perevedentsev Y.P., Vilfand R.M., Shantilinskii K.M. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P. 5–25.

The spatial and temporal changes of atmosphere pressure and surface air temperature in the non-tropical latitudes of the Northern Hemisphere over the period 1900–2014 are discussed.

To estimate these changes in the latitudinal zone 20–90° N, the mean values of atmosphere pressure and surface air temperature were calculated for the periods 1900–1929, 1930–1959, 1960–1987, 1988–2000 for pressure and 1900–1929, 1930–1959, 1960–1987, 1988–2000, 1988–2014 for temperature. Then special charts were constructed where the values of differences between the previous period and the following period were plotted. The degree of conformity between the obtained maps of differences was determined using the analogue criterion. It was found out that the best similarity exists between the periods 1988–2000 and 1988–2014. The long-term variations of low frequency components of atmosphere pressure and surface air temperature were examined at the centers of action of the atmosphere and in the Volga region of Russia.

The influence of the atmospheric circulation on the thermal regime at non-tropical latitudes was studied using a composite method.

Keywords: atmospheric pressure, air temperature, difference of mean values, centers of action of the atmosphere, low-frequency component, composite method.

Таб. 2. Fig. 7. Ref. 24.

Assessment of agrometeorological indicators of conditions of wintering of winter grain crops in the central chernozem regions in the conditions of climatic changes / Tarasova L.L. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P. 26–44.

Dynamics of conditions of wintering of winter grain crops (the soil temperature, minimum during the winter, at a depth of 3 cm (depth of the crops tillering); heights and lifetime of the snow cover bedding), and also of the indicator of severity of winter and the areas with bad condition of crops in the spring from 1964 to 2012 in the central chernozem regions is investigated. Using updated information, new dependences of the percentage of the areas with bad condition of crops in spring on the soil temperature minimal during the winter at the depth of the crops tillering are obtained.

It is shown that on the whole modern climate changes positively affect the safety of winter crops. The observed changes of the soil climate and of the regime of snow cover in the winter make the conditions for the crops wintering close to the optimum.

Keywords: conditions of the winter grain crops wintering, percentage of the areas with bad condition of crops in the spring, climate of the soil, snow cover, indicator of severity of winter.

Таб. 2. Fig. 6. Ref. 20.

About the dynamics of the agroclimatic indicators of conditions of sowing, wintering and formation of the yield of the main grain crops / Vilfand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P. 45–78.

The results of the studies of the thermal regime in the vegetation and winter period in the European territory of Russia are presented. The change of the probability of severe droughts during the growing season and sowing of winter crops in autumn is shown. Distinction of the influence of the global warming of climate on overwintering of winter crops in areas of freezing and damping-off is revealed. Moistening conditions during the formation of the harvest of the main grain crops and their dynamics for a long-term period are investigated. Risks of droughts in May-June and a considerable shortage of harvests of winter and summer wheat are shown.

Keywords: climate change, agroclimatic indicators, risks, atmospheric drought, crop yield, conditions of sowing, condition of wintering of winter crops, adaptation.

Таб. 6. Fig. 13. Ref. 16.

Moisture content and moisture transfer during the warm half of the year in the troposphere over the Black Sea / Danova T.E., Prokofev O.M. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P.79–94.

The results of the study of moisture exchange elements of the Black Sea region are presented. In the warm season in the troposphere a «moisture river» is formed, its formation is related to the northwestern flux. The moisture content maximum is near the west coast of the Black Sea due to southern cyclone trajectories. Interpretation of the studied variables spectral density as their «energy spectrum» allowed to describe the zone in the eastern part of the Black Sea as an active area of cyclogenesis. A significant reduction of the amount of moisture in the area of its circulation has been shown.

Keywords: moisture content, moisture transfer, the spectral density, trajectories of cyclones, cyclogenesis.

Таб. 2. Fig. 3. Ref. 25.

Assessment of the SNOW-17 snow cover dynamics model potential usage in the operational hydrologic forecasting practice in Russia / Simonov Y.A., Licar E.-L.D., Frolova N.L. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P. 95–112.

Modeling of snow cover dynamics is an essential component of the river flow computational schemes and models for rivers with melt water income. Hydrometeorological data availability in the real time mode is one of the limitations of the operational hydrology, which sets demands to the snow model structure and thus data needs. Investigation of the possibility to use snow cover dynamics model SNOW-17 in the operational forecast hydrology is presented in the paper. Balanced structure of the model that makes it possible to compute the main snow characteristics using air temperature and precipitation only is one the biggest advantages of the model in terms of

its operational usage potential. Assessment of the model was made for the small watersheds located in the European Part of Russia. Primary outcome of the model computations using recommended parameters showed the model's potential in its further incorporation in flow forecasting schemes for operational hydrological forecast practice in Russia.

Keywords: snow cover, modeling, flow forecasts.

Таб. 3. Fig. 6. Ref. 16.

Future development of nowcasting for aviation meteorological service in the framework of Global aeronavigation plan (GANP) implementation / Ivanova A.R., Shakina N.P. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P. 113–134.

The present article is concerned with very short time forecasting of the aviation impact weather. Time spectrum for aviation forecasting is described. Significance of the nowcasting for aviation impact weather is explained. Some local and general aerodrome nowcasting systems operating in different countries are presented. Primary objectives and purposes of Aviation Research Development Project are described within framework of GANP (Global AeroNavigation Plan) implementation.

Keywords: meteorological service for aeronavigation, numerical weather prediction, aviation nowcasting systems, Global aeronavigation plan, aviation research development project.

Таб. 2. Fig. 3. Ref. 23.

Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information / Alekseeva A.A., Peskov B.E. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P. 135–148.

Presented are methods for practical application of radar measurements (MRL and DMRL) in the diagnosis of certain characteristics of rainfall and hail developed at the Hydrometcenter of Russia. A method for determining the intensity and amount of rainfall taking into account the calculated maximum convective velocity and of the velocity of transport of radio echo is suggested. The method for the diagnosis of hailfall on the underlying surface using radar measurements is set out in detail.

Keywords: convective maximum speed, intensity and amount of rainfall, hail, diagnosis using radar information.

Таб. 3. Fig. 1. Ref. 15.

The comparison of diurnal variations of air pollutants using measurements and calculations of a chemical transport model / Shalygina I.Y., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I., Konovalov I.B., Berezin E.V. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P. 149–167.

The technology for forecasting the air quality with the application of chemical transport models created at the Hydrometeorological Center of Russia is at a stage of verification of numerical calculations based on the data of the automated measurements of the concentration of the polluting substances. The comparison of the calculated and observed in Moscow concentrations at the ground level (average and maximum per day), as well as their diurnal course allowed to identify characteristic errors of calculations for certain specific pollutants. Errors are due mainly to the inaccuracy of the emission inventories used and the errors of forecasts of meteorological parameters. A method of post-processing of model calculations with the use of statistical correction of hourly calculation of concentrations is suggested. A test for independent sample showed the efficiency and applicability of the correction in the operational technology of air quality forecasting in the Moscow region.

Keywords: modeling of pollution of the atmosphere, the chemical transport model CHIMERE, the daily course of the polluting substances.

Таб. 1. Fig. 6. Ref. 24.

Ozone «mini-hole» over the north of Ural and Siberia / Nikiforova M.P., Vargin P.N., Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Kuznetsova I.N., Lukyanov A.N. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. – 2016. – Vol. 360. – P. 168–180.

An ozone «mini-hole» was for the first time (from 1970s) observed over the northern regions of Ural and Siberia during the end of January 2016: total ozone values were reduced there to 190-220 DU. Extreme low total ozone values were observed both according to the data from the stations of the Russian surface ozonometric network and the satellite instrument OMI-AURA, Finland-USA. Illustrations of dynamics of total ozone and different meteorological parameters exerting influence on ozone are shown; possible reasons and factors of abnormal ozone reduction are discussed.

Keywords ozone «mini-hole» event over Arctic, stratosphere composition, middle atmosphere dynamics.

Fig. 6. Ref. 26.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

журнала «Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации»

1. Статья 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. 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 редколлекцией.

3. 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.

4. 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 и почтовый 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/м², 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 (–) и минус; 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 черно-белыми, 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 подрисуночной подписи (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. Подписанная автором (авторами) на первой странице рукопись является оригиналом для печати. Вносить в корректуру статей значительные исправления и дополнения авторам не разрешается.

12. Редакция сохраняет за собой право делать необходимые редакционные исправления.

13. Статьи, поступающие в редакцию журнала, подлежат обязательному независимому рецензированию.

Порядок рецензирования рукописей представлен на сайте: <http://www.meteoinfo.ru/review-order>

14. В случае возвращения статьи автору для переработки датой поступления считается дата получения редакцией окончательного текста.

15. Плата с авторов, в том числе аспирантов, за публикацию рукописей не взимается.

Гидрометеорологические прогнозы

**ТРУДЫ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Выпуск
360**

Под редакцией
д-ра геогр. наук И.Н. Кузнецовой,
канд. геогр. наук И.Ю. Шалыгиной

Адрес: 123242 Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13
Телефон: (499) 252-34-48, факс: (499) 255-15-82
e-mail: : hmc@mecom.ru
web site: <http://www.meteoinfo.ru>

Подписано в печать 20.07.2016. Формат 60×84/16
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.triadaltld.ru