

ISSN 2618-9631

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ

Продолжение серии периодического журнала
«Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра
Российской Федерации»

№ 2 (376)

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук А.Р. Ивановой

HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH and FORECASTING

No. 2 (376)

Москва
2020

Гидрометеорологические исследования и прогнозы – научный рецензируемый журнал, продолжает серию периодического журнала «Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации» (ISSN 0371 – 7089). Издается с 1947 года.

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки с 01.12.2015 года.

Выпуск журнала содержит статьи с результатами исследований в различных областях гидрометеорологической науки. Большую часть сборника занимают работы, посвященные диагнозу и прогнозу глубокой конвекции и циклогенеза при использовании информации метеорологических спутников Земли и данных радиолокационных измерений. Численное моделирование процессов в океане представлено результатами верификации модельных расчетов волнения на акватории Обской губы. Исследованию экстремальных гидрологических явлений посвящена работа, описывающая метеорологические условия формирования сильного наводнения в бассейне реки Амур. Городскую метеорологию представляет анализ особенностей острова тепла в Санкт-Петербурге. В разделе «Дискуссионные вопросы» обсуждается влияние гравитационных сил в системе Земля-Луна-Солнце на формирование аномалий приземной температуры. Сборник завершает обзор материалов 18-й сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-18).

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: *Вильфанд Р.М.*, д-р техн. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА: *Васильев А.А.*, д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Болгов М.В., д-р техн. наук, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

Борщ С.В., канд. геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Варданян Л.Р., канд. техн. наук, Национальная служба Армении по гидрометеорологии и мониторингу, г. Ереван, Армения

Васильев П.П., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Зайцева Н.А., д-р геогр. наук, Отделение наук о Земле РАН, г. Москва, Россия

Иванова А.Р., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Калинин Н.А., д-р геогр. наук, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

Клещенко А.Д., д-р геогр. наук, ВНИИСХМ Росгидромета, г. Обнинск, Россия

Козьмо К., PhD, Центр прогнозов погоды и климатических исследований, Сан-Жозе дос Кампос, Бразилия

Кричак С.О., д-р физ.-мат. наук, Тель-Авив, Израиль

Кузнецова И.Н., д-р. геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Логинов В.Ф., академик НАН Беларуси, д-р геогр. наук, Центр климатических исследований НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Муравьев А.В., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Нестеров Е.С., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Полевой А.Н., д-р геогр. наук, Одесский государственный экологический университет, г. Одесса, Украина

Полонский А.Б., член-корр. РАН и НАН Украины, д-р геогр. наук, Институт природно-технических систем, г. Севастополь, Россия

Реснянский Ю.Д., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Ривин Г.С., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Сокол З., д-р наук, Институт физики атмосферы Академии наук Чешской Республики, Прага, Чешская Республика

Страшная А.И., канд. геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Толстых М.А., д-р физ.-мат. наук, Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

Успенский А.Б., д-р физ.-мат. наук, НИЦ «Планета», г. Москва, Россия

Хан В.М., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Христофоров А.В., д-р геогр. наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Шакина Н.П., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Hydrometeorological Research and Forecasting – the scientific peer-reviewed journal continues the series «Proceedings of the Hydrometcenter of Russia» established in 1947.

The present issue of the journal contains papers with the results of research in various fields of hydrometeorological science. Most of the issue deals with the diagnosis and forecasting of deep convection and cyclogenesis using satellite and radar data. The numerical modeling of processes in the ocean is represented by the results of verification of model simulations of waves in the Gulf of Ob. The paper describing meteorological conditions for the formation of the severe flood in the Amur River basin deals with studying extreme hydrological phenomena. Urban meteorology is represented by the analysis of features of the heat island over Saint Petersburg. The “Discussion” section presents discussions on the influence of gravitational forces in the Earth-Moon-Sun system on the formation of surface temperature anomalies. The issue ends with the review of results of the 18th Session of the North Eurasian Climate Forum (NEACOF-18).

EDITOR IN CHIEF: *Roman M. Vilfand*, Doctor of Engineering Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

EDITORIAL BOARD:

Vasiliev A.A., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Bolgov M.V., Doctor of Engineering Sciences, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Borsch S.V., PhD in Geography, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Vardanyan L.R., PhD in Engineering, National Monitoring and Weather Service of Armenia

Vasiliev P.P., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Zaytseva N.A., Doctor of Geographical Sciences, Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow, Russia

Ivanova A.R., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Kalinin N.A., Doctor of Geographical Sciences, Perm State University, Perm, Russia

Kleshchenko A.D., Doctor of Geographical Sciences, All-Russian Scientific-Research Agricultural Institute, Obninsk, Kaluga region

Coelho C., PhD, Center for Weather Forecasts and Climate Studies CPTEC/INPE – BRAZIL, San Jose dos Campos, Brazil

Krichak S.O., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Tel-Aviv, Israel

Kuznetsova I.N., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Loginov V. F., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Center of Climate Research, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Muraviev A.V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Nesterov E.S., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Polevoy A.N., Doctor of Geographical Sciences, State Ecological University, Odessa, Ukraine

Polonsky A.B., Associate Member of RAS and National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Geographical Sciences, Institute of Natural-Technical Systems, Sevastopol, Russia

Resnyansky Yu.D., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Rivin G.S., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Sokol Z., Doctor Science, Institute of Atmospheric Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic

Strashnaya A.I., PhD in Geography, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Tolstykh M.A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS, Moscow, Russia

Uspensky A.B., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, State Research Center "Planeta", Moscow, Russia

Khan V.M., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Khristoforov A. V., Doctor of Geographical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Russia

Shakina N.P., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Диагноз и прогноз элементов атмосферной циркуляции с использованием информации средств дистанционного зондирования атмосферы

Способы оценки максимальной конвективной скорости в диагнозе и прогнозе опасных конвективных явлений погоды	6
<i>Алексеева А.А.</i>	
Анализ быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции по картам спутникового диагноза	23
<i>Бухаров М.В., Бухаров В.М.</i>	
Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования	39
<i>Шишов А.Е., Горлач И.А.</i>	
Диагноз и прогноз циклогенеза по данным спутникового зондирования атмосферы	60
<i>Акимов Л.М., Расторгуев И.П., Неижмак А.Н.</i>	

Численное моделирование процессов в атмосфере и океане

Верификация модельных расчетов волнения на акватории Обской губы по данным инструментальных измерений в 2015–2017 годах	79
<i>Коробов П.В., Алексеев В.В., Дымов В.И., Яковлева Н.П., Смирнов К.Г.</i>	

Исследование экстремальных гидрологических явлений

Метеорологические условия формирования сильного наводнения в бассейне реки Амур в 2019 году	90
<i>Василевская Л.Н., Лисина И.А., Василевский Д.Н., Агеева С.В., Подвербная Е.Н.</i>	

Городская метеорология

Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе	109
<i>Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Цепелев В.Ю.</i>	

Дискуссионный раздел

Перигейно-сизигийные приливы в атмосфере	126
<i>Сидоренков Н.С., Петров В.Н.</i>	

Информационные сообщения

О результатах восемнадцатой сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-18)	141
<i>Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Каверина Е.С., Сумерова К.А., Куликова И.А., Круглова Е.Н.</i>	

CONTENTS

Diagnosis and Forecasting of Atmospheric Circulation Elements from Remote Sensing Data

Methods to estimate maximum convective velocity for the diagnosis and forecasting of severe convective weather events	6
<i>Alekseeva A.A.</i>	
Analysis of the rapidly growing deep-convection mesoscale system on diagnostic satellite charts	23
<i>Bukharov M.V., Bukharov V.M.</i>	
An algorithm for the detection and tracking of deep convection using satellite data and integer programming	39
<i>Shishov A.E., Gorlach I.A.</i>	
Cyclogenesis diagnosis and forecasting from satellite data	60
<i>Akimov L.M., Rastorguev I.P., Neizhmak A.N.</i>	

Numerical Modelling of Atmospheric and Oceanic Processes

Verification of model calculations of waves in the Gulf of Ob on the basis of instrumental measurement data in 2015-2017	79
<i>Korobov P.V., Alekseev V.V., Dymov V.I., Yakovleva N.P., Smirnov K.G.</i>	

Investigation of Extreme Hydrological Events

Meteorological conditions for the formation of the severe flood in the Amur River basin in 2019	90
<i>Vasilevskaya L.N., Lisina I.A., Vasilevsky D.N., Ageeva S.V., Podverbnaya E.N.</i>	

Urban Meteorology

Identification of periods with maximum heat island intensity in St. Petersburg for the validation of numerical weather forecasts	109
<i>Ladohina E.M., Rubinshtein K.G., Tsepelev V.Y.</i>	

Discussion section

Peregee-syzygy tides in the atmosphere	126
<i>Sidorenkov N.S., Petrov V.N.</i>	

Communication

On the results of the Eighteenth Session of the North Eurasian Climate Forum (NEACOF-18)	141
<i>Khan V.M., Vifland R.M., Tischenko V.A., Kaverina E.S., Sumerova K.A., Kulikova I.A., Kruglova E.N.</i>	

УДК 551.501.815

Способы оценки максимальной конвективной скорости в диагнозе и прогнозе опасных конвективных явлений погоды

А.А. Алексеева

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
antonida_alekseeva@mail.ru*

Рассмотрены способы расчета максимальной скорости конвективных потоков в облаках на основе выходных данных гидродинамической модели REGION ФГБУ «Гидрометцентр России», а также спутниковой и метеорологической радиолокационной информации. Точность прогнозируемых максимальных конвективных скоростей существенно зависит от точности прогнозирования приземных значений температуры и влажности воздуха. Диагностические расчеты максимальной конвективной скорости на основе спутниковой и радиолокационной информации характеризуются высоким пространственным (порядка 4 км) и временным (10–15 мин) разрешением. Они позволяют уточнить краткосрочный прогноз опасных конвективных явлений погоды, особенно места и времени их возникновения. Предлагаемый подход к определению максимальной конвективной скорости в развитой конвективной облачности, а также ее расчет по спутниковым и метеорологическим радиолокационным данным, является разработкой ФГБУ «Гидрометцентр России». Он используется в методах прогноза опасных конвективных явлений погоды в летний период года, внедренных в оперативную практику, при разработке новых подходов к диагностированию параметров конвекции по данным сети ДМРЛ-С, при создании карт опасных конвективных явлений погоды, выпускаемых в ФГБУ «НИЦ «Планета».

Ключевые слова: максимальная конвективная скорость, гидродинамическая модель REGION, спутниковая информация, информация доплеровских локаторов ДМРЛ-С, прогноз, диагноз

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-6-22>

Methods to estimate maximum convective velocity for the diagnosis and forecasting of severe convective weather events

A.A. Alekseeva

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
antonida_alekseeva@mail.ru*

Methods for calculating the maximum velocity of convective updrafts in clouds based on output data of the REGION hydrodynamic model (Hydrometcentre of Russia), as well as on satellite and radar information, are considered. The accuracy of predicted maximum convective velocities largely depends on the accuracy of surface air temperature and humidity prediction. The diagnostic calculations of maximum convective

velocity based on satellite and radar data are characterized by the high spatial (about 4 km) and temporal (10-15 minutes) resolution. They allow updating a short-range forecast of severe convective weather events, especially the place and time of their occurrence. The proposed approach to the determination of maximum convective velocity in mature convective clouds as well as its calculation based on satellite and weather radar data was developed at Hydrometcentre of Russia. It is utilized in the methods for forecasting severe convective weather events in summer implemented to operational practice for developing new approaches to the diagnosis of convection parameters from DMRL-C data and for constructing the maps of severe convective weather events produced by «Planeta» Research Centre.

Keywords: maximum convective velocity, REGION hydrodynamic model, satellite data, DMRL-C Doppler radar data, forecast, diagnosis

Введение

Формирование погоды относится к очень сложным процессам, в которых задействовано множество сил. Они, в свою очередь, образуют большое количество цепей обратной связи, поэтому прогноз погоды есть установление вероятностей. Вертикальные движения в тропосфере принадлежат к числу коренных причин формирования погоды. Рассматривая облако как динамическую систему, возникновение, рост и рассеивание в результате крупномасштабных движений в атмосфере, можно говорить о макрофизическом аспекте.

Образование же непосредственно конвективных облаков связано с восходящим движением воздушных масс, которое может возникнуть в результате действия фронтальных или внутримассовых (прогрева подстилающей поверхности) процессов, а также особенностей орографии. При этом стратификация атмосферы становится неустойчивой, и в зависимости от величины и характера высвобождающейся энергии при разрешении неустойчивости и других причин в тропосфере возникают и развиваются атмосферные процессы с грозами, нередко сопровождающиеся сильными ливнями, шквалами, торнадо и выпадением града. Нужна большая изобретательность, чтобы проанализировать конвективный шторм как термодинамический процесс, подчиненный тем же законам физики, которые изучаются в лабораториях, то есть до сих пор нельзя сказать, что такие процессы полностью изучены.

Не зная того, как осуществляется подъем воздушных масс в конвективном облаке, как меняются параметры потока в пространстве и времени, нельзя понять механизм образования ливневых осадков, шквалов, торнадо, а значит, дать их прогноз с достаточной для принятия превентивных мер защиты заблаговременностью. Структурный состав грозовых процессов обычно представляет собой комплекс очагов, каждый из которых является единицей конвективной циркуляции, объединяющей как восходящие, так и нисходящие потоки. В каждом очаге происходит собственный цикл развития во временном интервале от 30 мин до часа.

Очаги при этом развиваются различными темпами, некоторые могут уже затухать, другие в это время ускоряются в своем развитии, нередко сливаются. В восходящих потоках воздух имеет тенденцию к циклоническому вращению, иногда создавая при сильных грозах особенно благоприятные условия для формирования торнадо.

Попытки установить корреляционные зависимости между величиной всей энергии неустойчивости, количеством осадков и диаметром града не дали положительного результата [31]. Поэтому многие исследователи при оценке параметров конвективного облака используют скорость восходящих потоков, мощность облака, но не величину энергии неустойчивости. Величина максимальной скорости конвективного потока является одной из наиболее важных характеристик термодинамической неустойчивости атмосферы, обуславливающей развитие мощных кучево-дождевых облаков. Она определяет размер града, количество выпадающих осадков, является основным параметром атмосферы, характеризующим возникновение шквала и торнадо, то есть от ее величины зависит характер и интенсивность процессов возникновения и развития зон активной конвекции (ЗАК).

Максимальные значения скорости восходящего потока в кучево-дождевом облаке по данным наблюдений составляют 25–60 м/с [34]. Максимальная конвективная скорость W_m является основополагающим предиктором во многих методах прогноза конвективных явлений погоды, использующихся в оперативной практике синоптиков России [28, 29], а также в автоматизированных методах прогноза, рекомендованных к использованию на практике решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета [1–3, 6, 7]. К таким методам можно отнести и метод прогноза сильных шквалов [13]. Но рассчитать максимальную конвективную скорость не так просто, поэтому многие исследователи, а также прогнозисты оценивают косвенно конвективную неустойчивость через температурные и влажностные параметры атмосферы на разных уровнях, например [23, 24], а также с использованием индексов неустойчивости [12, 19, 25, 30].

Целью представленной работы является демонстрация того, как максимальные скорости конвективных движений оцениваются на основе модельных данных, а также цифровой спутниковой и радиолокационной информации (в том числе доплеровских локаторов ДМРЛ-С) во внедренных в практику методах прогноза опасных конвективных явлений погоды и подходах к их диагностированию.

Исходя из вышесказанного о важности максимальной конвективной скорости как количественного показателя интенсивности конвекции, можно утверждать, что результаты представляемых исследований являются актуальными и практически значимыми.

Способы расчета максимальной скорости конвективного потока

Наиболее известными методами для оценки (расчета) величины скорости восходящего конвективного потока, активно использующимися на практике за рубежом и в России, по данным стратификации атмосферы являются метод частицы [29, 32] и метод слоя [26], способы Н.В. Лебедевой [20], Н.С. Шишкина [33] и Н.И. Глушковой [29, 31].

По методу частицы скорость восходящего потока рассчитывается без учета потерь тепла на компенсирующее опускание сухого воздуха [29, 32], что, конечно же, является искусственным допущением.

Метод слоя, предложенный Бьеркнесом [35] и развитый в дальнейшем Петерсеном [26] и Шишкиным [33], учитывает нисходящие движения в окружающей среде. Основными допущениями, положенными в основу метода слоя, являются следующие. Предполагается, что нисходящие движения являются сухоадиабатическими, а восходящие – влажноадиабатическими, количество поднимающегося воздуха равно количеству опускающегося. Кроме того, допускается отсутствие горизонтальных перемещений воздуха.

По методу Н.В. Лебедевой на поверхностях, кратных 100 гПа, определяется среднее отклонение кривой состояния от кривой стратификации. По этому значению рассчитывается средняя скорость конвективного потока [20]. Однако опасные явления определяются не средней, а максимальной скоростью восходящего потока.

Н.С. Шишкиным получена формула для расчета скорости роста облачной башни, которая представляет собой осредненную скорость подъема облачной массы в данном слое [33].

Исследования, проведенные в Высокогорном геофизическом институте [31], показали, что прослеживается четкая корреляционная связь между параметрами конвективного облака и лишь той частью энергии неустойчивости, которая заключена между уровнем конденсации и уровнем максимальной скорости конвективного потока (т. е. в слое активного облакообразования), а не всей энергией неустойчивости. Это был принципиально новый вывод относительно принятых в метеорологии мнений по этому вопросу. Он утверждал, что критерий развития конвекции можно определить не только соотношением масс восходящего и нисходящего потоков, но и соотношением масс слоев воздуха, участвующих в конвекции. Н.И. Глушковой на основе анализа экспериментальных данных, расчета энергии неустойчивости влажнонеустойчивого слоя и сопоставления расчетов с фактическими данными получена формула для расчета максимальной скорости конвективного потока [29, 31]:

$$W_m = \sqrt{2\eta c_p \Delta T_{\max} \lg \frac{P_1}{P_2}}, \quad (1)$$

где W_m – величина максимальной скорости конвективного потока, м/с; $\Delta T_{\max}$ – максимальное отклонение кривой состояния от кривой стратификации на верхней границе влажнонеустойчивого слоя (по методу частицы); P_1 и P_2 – давление на уровне конденсации и верхней границы влажнонеустойчивого слоя; η – коэффициент, показывающий, какая часть тепла во влажнонеустойчивом слое расходуется на компенсирующее опускание сухого воздуха; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

В рекомендованных ЦМКП Росгидромета методах прогноза опасных конвективных явлений [1–3, 6, 7] реализуется одномерная стационарная модель конвекции, а скорость максимальных конвективных потоков на ее основе вычисляется по методу Н.И. Глушковой по формуле (1). Расчеты производятся на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России [21]. Пример расчета максимальной конвективной скорости данным способом приведен на рис. 1а.

Наибольший запас энергии неустойчивости атмосферы отмечается перед началом развития конвекции [14, 15]. Определение параметров конвекции по данным стратификации атмосферы при уже развитой конвективной облачности, связанной с циклонами и фронтами, не имеет физического смысла, поскольку в таком облаке кривая состояния будет близка к кривой стратификации. В методах прогноза [1–3, 6, 7], рекомендованных ЦМКП Росгидромета к внедрению в оперативную практику, и в [13] максимальная конвективная скорость ($W_{m_вл}$) в таких случаях рассчитывается по экспериментальной зависимости по значению массовой доли влаги у поверхности земли и мощности конвекции [22]:

$$W_{m_вл} = \frac{0,23 \cdot 3,79 \cdot \exp\left(\frac{17,13 Td}{Td + 235}\right)}{0,85(H_m - H_k)}, \quad (2)$$

где Td – температура точки росы у поверхности земли, °C; H_m и H_k – высоты верхней и нижней границ кучево-дождевого облака, соответственно, км.

Расчеты по (2) производятся при определенных условиях развития ЗАК, а именно: средних значениях дефицита точки росы $\overline{d_{8,7}} < 3,0$ °C в слое 850–700 гПа, $\overline{d_{5,4}} \leq 4,0$ °C в слое 500–400 гПа и дефиците точки росы $d_4 \leq 3,5$ °C на уровне 400 гПа.

Пример расчета максимальной конвективной скорости по формуле (2) на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России приведен на рис. 1б.

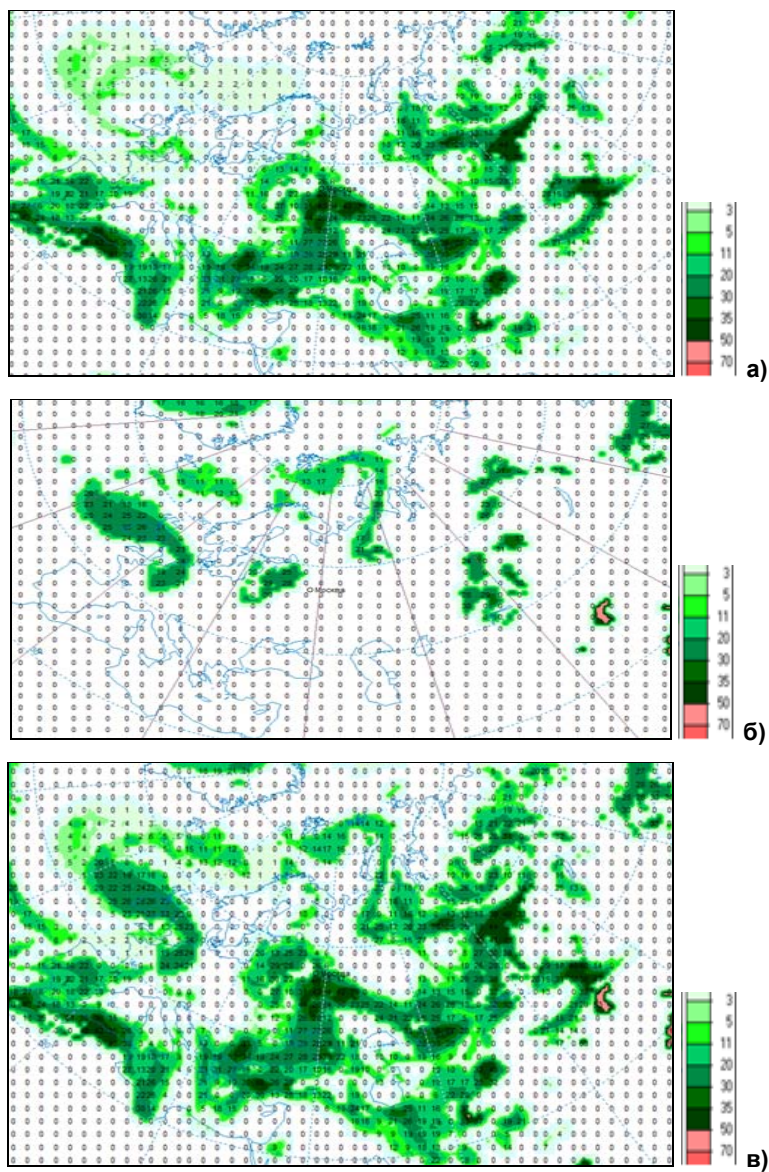


Рис. 1. Карты прогноза максимальной конвективной скорости, м/с: по формуле (1) (а); по формуле (2) (б); максимальное значение по (1) и (2) (в) на 15 ч ВСВ 15.06.2012 г. с заблаговременностью 15 ч на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России.

Fig. 1. The forecast maps for the maximum convective velocity (m/s): based on (1) (a); based on (2) (б); the maximum value of (1) and (2) (в) for 15.00 UTC on June 15, 2012 with a lead time of 15 hours based on the output data of the regional model of Hydrometcentre of Russia.

Во внедренных в практику автоматизированных методах прогноза опасных конвективных явлений уже более 10 лет используется максимальное из рассчитанных по формулам (1) и (2) значение максимальной конвективной скорости. Пример прогноза результирующего значения максимальной конвективной скорости представлен на рис. 1в.

В исследовании [13] показано, что на выборке размером более 120 тыс. случаев результирующая максимальная скорость конвективных потоков, наибольшая из рассчитанных по (1) и (2), оказалась наиболее информативным предиктором для прогноза шквалов среди 73 рассмотренных предикторов. Причем в список этих предикторов входили и максимальные скорости конвективного потока, по отдельности рассчитанные по (1) и (2).

Практикующий в России синоптик, как правило, имеет возможность рассчитывать максимальные конвективные скорости по аэрологическим данным в лучшем случае два раза в сутки. Конвективные скорости, рассчитанные в рамках гидродинамических моделей, как правило, синоптику не доступны, так как являются внутренним «продуктом» модели и в базы данных выходной продукции не записываются и не передаются на сеть.

В связи с вышесказанным большую роль приобретает расчет максимальной скорости конвективного потока по данным спутниковой информации, зарекомендованный на практике [4, 5, 9, 10, 17, 28], а также по радиолокационным данным [8, 16].

Получена зависимость W_m от высоты верхней границы кучево-дождевого облака H_m , км [15, 17, 28]:

$$W_m = kH_m^2. \quad (3)$$

Для кучево-дождевых облаков $k = 0,18$ при коэффициенте корреляции 0,82; для кучево-дождевых облаков, развивающихся на фоне слоисто-дождевых, $k = 0,09$ при коэффициенте корреляции 0,78.

Высоту верхней границы облаков можно определить как по данным радиозондирования в невозмущенной атмосфере или по модели конвекции, так и по данным радиолокационных и спутниковых наблюдений. Зависимость, описанная формулой (3), положена в основу расчета W_m по снимкам облачности с ИСЗ [28], а также по цифровым спутниковым данным [4, 9].

Пример расчета максимальной скорости конвективного потока по цифровым данным спутниковых наблюдений приведен на рис. 2. В настоящее время максимальные скорости конвективного потока рассчитываются в ФГБУ «НИЦ «Планета» на основе и других спутников (Meteosat-10, MTSAT-IR и др.) [5, 10, 11]. Их значение является основополагающим в диагностике опасных конвективных явлений на основе цифровой спутниковой информации. Данные о диагностируемых опасных конвективных явлениях в оперативном режиме (каждые 15 мин) передаются потребителям [11].

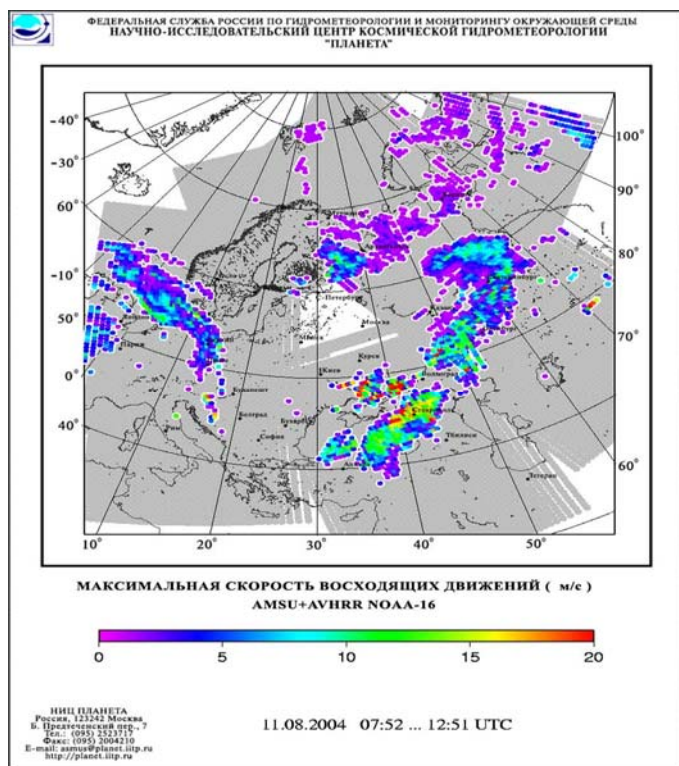


Рис. 2. Карта рассчитанных максимальных конвективных скоростей (м/с) на 11.08.2004 г., сроки 07.52 ... 12.51, по цифровой спутниковой информации AMSU + AVHRR NOAA-16.

Fig. 2. The map of calculated maximum convective velocities (m/s) for August 11, 2004 for the time moments 07:52 ... 12:51 based on AMSU + AVHRR NOAA-16 digital satellite information.

Информация одного метеорологического лоатора позволяет анализировать ход только мезомасштабных атмосферных процессов. Это заведомо снижает заблаговременность и точность прогноза опасных конвективных явлений погоды, связанных с прохождением атмосферных фронтов. Сеть метеорологических радиолокаторов расширяет возможность использования радиолокационной информации на синоптическом масштабе. Ранее в результате проведенных исследований разработан комплекс методов диагноза и прогноза опасных конвективных явлений, вошедших в Руководство [28], на основе использования радиолокационных и спутниковых данных наблюдений. Для расчета максимальной скорости конвективного потока по радиолокационным данным определена взаимосвязь W_m и $H_m \lg z_m$, где H_m – максимальная верхняя граница облака; $\lg z_m$ – максимальная радиолокационная отражаемость от облака. Коэффициент корреляции между параметрами W_m и $\lg z_m$ оказался

низким, а между W_m и $H_m \lg z_m$ – высоким (0,82). Уравнение регрессии (W_m в м/с) имеет вид [8, 15, 28]:

$$W_m = 0,36H_m \lg z_m + 3,52. \quad (4)$$

Расчет максимальной скорости конвективных потоков на основе данных ДМРЛ-С

В [8] подробно изложен способ расчета максимальной скорости конвективного потока по данным доплеровских локаторов ДМРЛ-С, в последнее время внедренных в России в производственную практику в процессе расширения радиолокационной сети.

Для расчета используются данные 10-минутных наблюдений. В каждом узле расчетной сетки $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ базы данных DMRL-C, созданной в ФГБУ «Гидрометцентр России», выбирается значение горизонтальной отражаемости на 11 уровнях и находится максимум (максимальная радиолокационная отражаемость ДМРЛ-С, dBZ_m в dBZ). Считывается в узле также значение верхней границы облачности. При этом значение H_m в формуле (5) берется в километрах. Максимальная конвективная скорость (м/с) рассчитывается следующим образом:

$$W_{m_ДМРЛ-С} = 1,33[0,038H_m(dBZ_m - 18) + 3,52] + 4,0. \quad (5)$$

Рассмотрим случай диагностирования максимальной конвективной скорости на примере 13 июля 2016 г. для территории Московской области. На рис. 3 (слева) представлены данные о типах облачности и метеорологических явлениях ДМРЛ-С «Профсоюзная» г. Москвы за сроки наблюдений 18.40, 18.50 и 19.00 ВСВ, а справа – диагностированные предлагаемым алгоритмом [8] значения максимальной конвективной скорости (м/с) за эти же сроки. Значение «-1» на карте максимальных конвективных скоростей означает отсутствие данных ДМРЛ-С. Как видно из рис. 3, дополнительная информация о максимальной конвективной скорости позволяет увидеть более детальную картину развития ЗАК в реальном времени, синхронном с уже имеющейся радиолокационной информацией.

На рис. 4 для сравнения приведены карта радиационной температуры на верхней границе облаков по данным ИСЗ за 19.30 ч ВСВ 13.07.2016 г. (слева) и диагностированные максимальные конвективные скорости по данным ДМРЛ-С за этот же срок (справа). Как видим, анализ в комплексе представленных спутниковых и радиолокационных данных позволяет более детально анализировать ЗАК и более точно сделать выводы относительно интенсивности возможных опасных конвективных явлений. 10-минутная детальность таких данных (а также использование в дополнение данных о верхней границе облачности) позволит отслеживать эволюцию ЗАК.

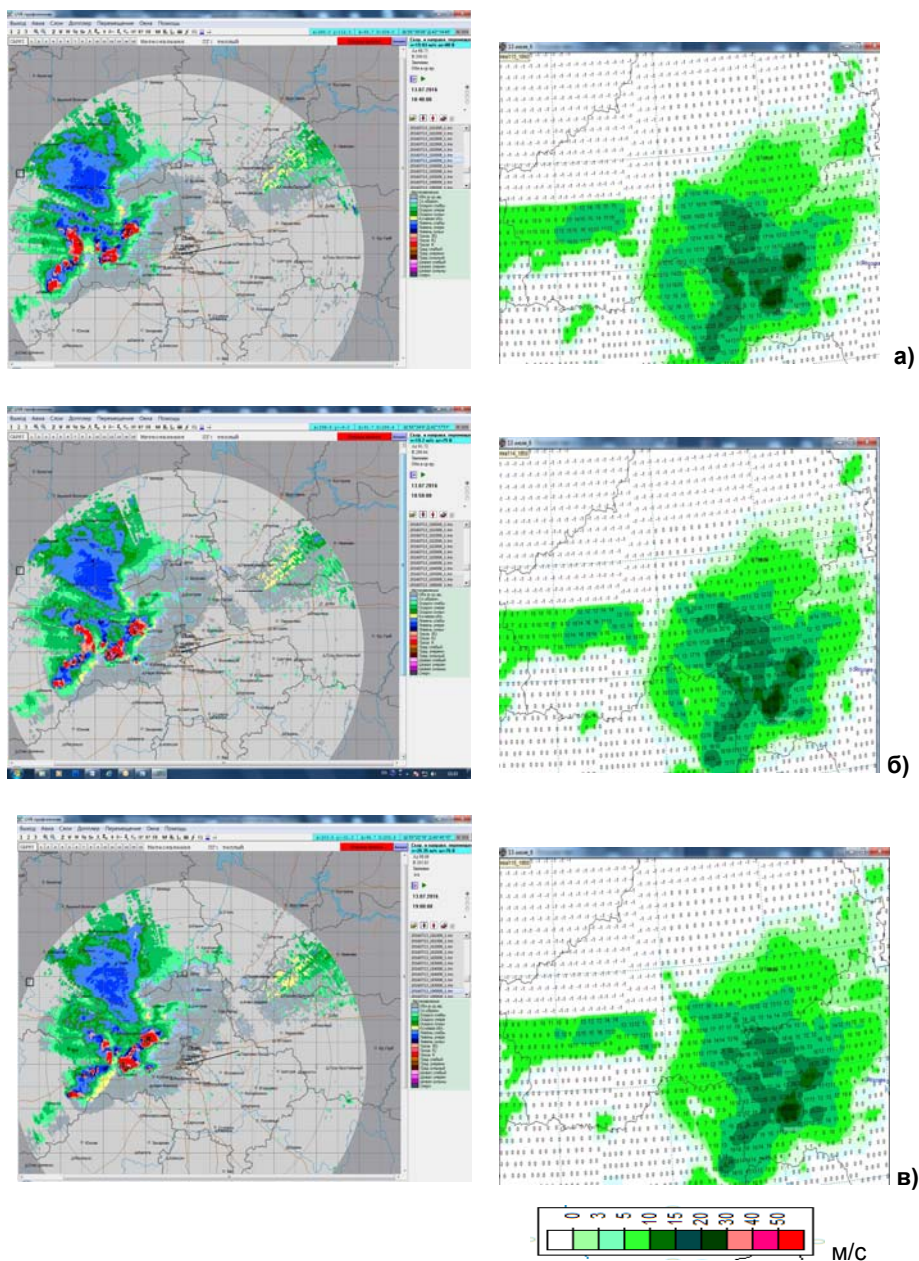


Рис. 3. Данные о типах облачности и метеоявлениях по данным ДМРЛ-С «Профсоюзная» (слева) и диагностированные максимальные конвективные скорости (справа) по данным ДМРЛ-С за сроки 18.40 (а), 18.50 (б) и 19.00 (в) ч ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 3. Data on cloud types and weather phenomena according to DMRL-C Profsoyuznaya (on the left) and diagnosed maximum convective velocities (on the right) according to DMRL-C data for (a) 18.40, (б) 18.50, and (в) 19.00 UTC on July 13, 2016.

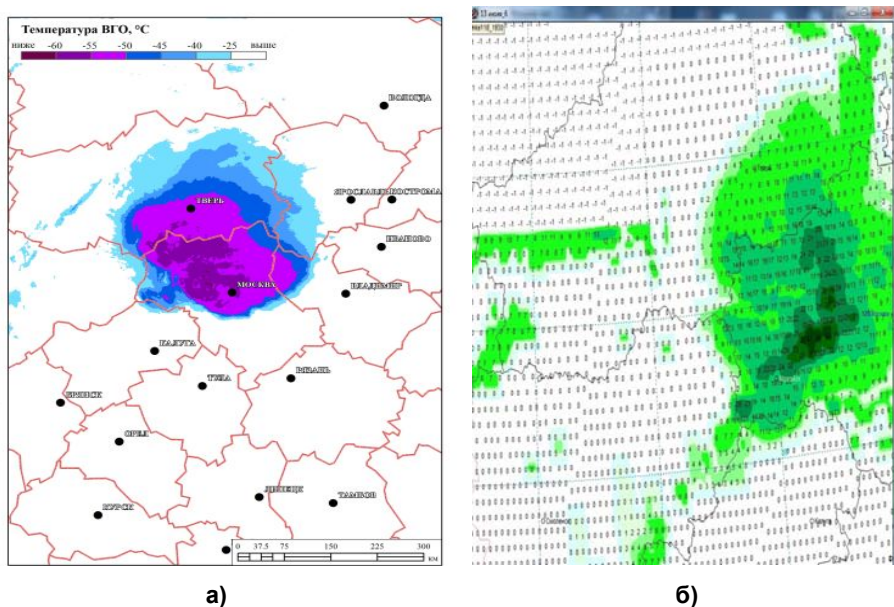


Рис. 4. Температура на верхней границе облачности по данным ИСЗ (а) и диагностированные максимальные конвективные скорости (м/с) по данным ДМРЛ-С (б) за срок 19.30 ВСВ 13.07.2016 г.

Fig. 4. The cloud top temperature according to satellite data (a) and the diagnosed maximum convective velocities (m/s) according to DMRL-C data (b) for 19.30 UTC on July 13, 2016.

В настоящее время предлагаемый в [8] алгоритм реализован [27], рассчитанные значения максимальных конвективных скоростей на основе данных ДМРЛ-С с 10-минутным разрешением с шагом сетки $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ по ЕТР с 1.08.2019 г. (в летний период) записываются в базу данных DW Гидрометцентра России один раз в час с небольшой задержкой относительно реального времени. Диагностированные максимальные конвективные скорости по данным ДМРЛ-С использовались при анализе активных конвективных процессов с опасными конвективными явлениями погоды в Центральном регионе ЕТР в летние периоды 2016–2019 гг. Результаты анализа показали, что поле максимальных конвективных скоростей сети ДМРЛ-С с детализацией по площади 4 км и времени 10 мин позволяет уточнить краткосрочный прогноз опасных конвективных явлений погоды, особенно времени и места их возникновения.

Доплеровский локатор измеряет суммарный вертикальный поток воздуха, включая относительную скорость выпадения осадков. Основные движения, обнаруженные локатором, скорее вызваны скоростями падения осадков, чем вертикальными потоками воздуха. Поэтому вертикальные движения, обнаруженные доплеровским локатором, являются не очень эффективным количественным показателем активной конвекции [18]. А максимальные конвективные скорости, оцененные по данным ДМРЛ-С,

позволят дополнить имеющиеся радиолокационные данные эффективным количественным показателем развития зон активной конвекции.

Заключение

На основе результатов довольно продолжительного периода исследований можно констатировать, что максимальная конвективная скорость является одним из основных параметров атмосферы, характеризующим развитие активной конвекции. Она является предиктором во многих методах диагноза [9, 28] и прогноза опасных конвективных явлений погоды [1–3, 6, 7, 28, 29], поэтому важно иметь как можно более точные и детализированные по времени и пространству данные о ней. Рассчитанные на основе цифровой спутниковой и радиолокационной информации (данных ДМРЛ-С) значения максимальной конвективной скорости помогут синоптику-практику уточнять краткосрочные прогнозы опасных конвективных явлений, в том числе реализованные на данных численных моделей, а также штормовые оповещения. Такие диагностические данные, в отличие от максимальных конвективных скоростей, рассчитанных на основе данных радиозондирования, имеют высокое пространственное разрешение и диагностируются на основе использования данных доплеровских локаторов (ДМРЛ-С) и цифровой спутниковой информации каждые 10 и 15 мин соответственно.

Формула расчета максимальной конвективной скорости (2) позволяет рассчитывать ее при уже развитой конвективной облачности, связанной с циклонами и фронтами, когда определение параметров конвекции по данным стратификации атмосферы не имеет физического смысла, поскольку кривая стратификация в облаке оказывается близка к кривой состояния.

Таким образом, показано, что важный параметр конвекции можно рассчитать на основе использования выходных данных гидродинамических моделей, аэрологической, спутниковой и радиолокационной информации. Если на точность расчета максимальной конвективной скорости на основе модельных данных большое влияние оказывает точность прогноза приземных температуры и влажности, то при использовании радиолокационной и спутниковой информации удастся избежать подобных ошибок за счет данных параметров. Кроме того, поскольку на данный момент автоматизированные методы прогноза опасных конвективных явлений, рекомендованные для использования в практике решениями ЦМКП Росгидромета, внедрены со статусом фоновых или вспомогательных и консультативных, роль диагностированных значений максимальных конвективных скоростей по спутниковым и радиолокационным данным, обладая детальным пространственным и временным разрешением, велика. Они полезны в уточнении прогноза таких явлений, особенно времени и места их осуществления, точность которых невелика при численном прогнозе. Кроме того, возможность расчета максимальной конвективной

скорости на основе цифровой спутниковой информации позволила разработать способ определения параметров атмосферных явлений в районах с облачным покровом [9], реализованный в ФГБУ «НИЦ «Планета» и более десяти лет использующийся на практике [11]. Расчет максимальной конвективной скорости по данным ДМРЛ-С открывает новые возможности при диагностировании опасных конвективных явлений погоды, уточнении их интенсивности. Возможно, данный подход найдет применение и при наукастинге таких явлений.

Выражаю благодарность сотрудникам ФГБУ «Гидрометцентр России»: В.М. Лосеву за предоставленные модельные данные, В.М. Бухарову за помощь в реализации алгоритма расчета максимальной конвективной скорости по данным ДМРЛ-С, В.Д. Жупанову, Д.Я. Прессману и А.Ю. Недачиной за создание базы данных ДМРЛ-С, Ю.В. Алферову за предоставленную возможность визуализации результатов исследований графическим пакетом Изограф, сотруднику ФГБУ «НИЦ «Планета» **М.В. Бухарову** за предоставленную спутниковую информацию.

The author thanks the specialists of Hydrometcentre of Russia V.M. Losev for the access to model data, V.M. Bukharov for assistance in implementing the algorithm for the calculation of the maximum convective velocity based on DMRL-C data, V.D. Zhupanov, D.Ya. Pressman and A.Yu. Nedachina for the organization of the DMRL-C database, Yu.V. Alferov for the opportunity to visualize the results of the studies with the Isograph graphic package and the specialist of RSC Planeta M.V. Bukharov for the access to satellite information.

Список литературы

1. Алексеева А.А. Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2007. Информационный сборник № 34. С. 49-69.
2. Алексеева А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5-15.
3. Алексеева А.А. Прогноз ураганных ветров внетропических циклонов на территории России // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 5-15.
4. Алексеева А.А., Бухаров М.В. Распознавание ливней и града по измерениям уходящего теплового излучения земли со спутника NOAA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 387-392.
5. Алексеева А.А., Бухаров М.В., Лосев В.М., Соловьев В.И. Диагноз осадков и гроз по измерениям уходящего теплового излучения облачности с геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2006. № 8. С. 33-42.
6. Алексеева А.А., Глушкова Н.И. Способ прогноза стихийных конвективных гидрометеорологических явлений теплого периода: Патент на изобретение RU 2162237. Бюлл. изобр. № 2 от 20.01.2001.
7. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 43-63.

8. *Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135-148.
9. *Бухаров М.В., Алексеева А.А.* Способ определения параметров атмосферных явлений в районах с облачным покровом: Патент на изобретение RU 2323459 02.04.2004.
10. *Бухаров М.В., Соловьев В.И., Алексеева А.А., Лосев В.М.* Оценка метеорологических параметров в облачности по спутниковым снимкам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Том 1. С. 77-82.
11. *Бухаров М.В., Кухарский А.В., Мисник Л.А.* Автоматизированное рабочее место «Планета-метеобзор» для мониторинга опасных атмосферных явлений, связанных с конвективной облачностью // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 64-69.
12. *Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А.* Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101-119.
13. *Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5-15.
14. *Глушкова Н.И.* Физические условия формирования мощных кучево-дождевых облаков и явлений, связанных с ними (грозы, града и ливня) // Труды Гидрометцентра СССР. 1974. вып. 136. С. 12-16.
15. *Глушкова Н.И.* Исследование взаимосвязи между различными параметрами облака и атмосферы при выпадении ливней и града // Труды Гидрометцентра СССР. 1978. Вып. 201. С. 38-46.
16. *Глушкова Н.И.* Об усовершенствовании прогнозов ливневых осадков и размера града с использованием радиолокационных данных // Труды Гидрометцентра СССР. 1978, Вып. 201. С. 51-56.
17. *Глушкова Н.И.* Прогноз осадков по данным спутниковых и радиолокационных наблюдений // Труды Гидрометцентра СССР. 1985. Вып. 266. С. 21-33.
18. *Дональдсон Р.Дж., Чмела А.К.* Распределение средней вертикальной скорости в грозе и ее вариации. Проблемы радиолокационной метеорологии // Сборник статей из трудов двенадцатой и тринадцатой конференций по радиолокационной метеорологии: Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 187 с. С. 46-54.
19. *Калинин Н.А.* Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь: Пермский государственный университет, 2015. 308 с.
20. *Лебедева Н.В.* Построение модели конвекции и расчет количества ливневых осадков // Труды ЦИП. 1954. Вып. 31 (58). С. 3-30.
21. *Лосев В.М.* Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 36-58.
22. *Отчет о выполнении научно-исследовательской работы Государственного научного центра Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. Моделирование региональных процессов и развитие методов прогнозов неблагоприятных гидрометеорологических явлений.* № гос. регистрации 01200212070, Москва, 2002.
23. *Переходцева Э.В.* Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2010. Вып. 344. С. 265-279.
24. *Переходцева Э.В.* О гидродинамико-статистическом прогнозе до двух суток явлений сильного ветра и сильных осадков для территории Северного Кавказа // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 101-111.
25. *Песков Б.Е.* Исследование условий развития гроз и шквалов с помощью диагностических диаграмм вероятности и индексов неустойчивости // Труды Гидрометцентра СССР. 1967. Вып. 13. С. 21-31.
26. *Петерсен С.* Анализ и прогноз погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 652 с.
27. Программа расчета максимальных скоростей конвективных движений по данным сети доплеровских локаторов ДМРЛ-С: Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2019662109 от 17.09.2019.

28. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу осадков, града и шквалов (опасных и стихийных) по данным МРЛ и ИСЗ. М.: Росгидромет, 1996. 180 с.
29. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды*. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 702 с.
30. *Спрыгин А.А., Прохареня М.И.* Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018. № 3 (369). С. 6-22.
31. *Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М.* Прогноз гроз, града и ливневых осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 188 с.
32. *Халтинер Дж.* Динамическая и физическая метеорология. Л., Гидрометеиздат, 1961. 435 с.
33. *Шишкин Н.С.* Облака, осадки и грозовое электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 351 с.
34. *Шметер С.М., Силаева В.И.* Вертикальные потоки внутри кучево-дождевых облаков // *Метеорология и гидрология*. 1966. № 10. С. 7-13.
35. *Bjerknes J.* Saturated-adiabatic ascent of air through dry-adiabatically descending environment // *Q. J. Roy. Met. Soc.* 1938. Vol. 64, no. 275.

References

1. *Alekseeva A.A.* Metody prognoza maksimal'nogo kolichestva osadkov v zonah aktivnoi konvekcii i alternativnogo prognoza sil'nyh livnei i shkvalov. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyi sbornik*, 2006, vol. 34, pp. 49-69 [in Russ.].
2. *Alekseeva A.A.* A method of forecasting severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 9, pp. 569-576. DOI: 10.3103/S1068373914090015.
3. *Alekseeva A.A.* Forecasting hurricane winds in extratropical cyclones in Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 1, pp. 1-8. DOI: 10.3103/S1068373917010010.
4. *Alekseeva A.A., Bukharov M.V.* Raspoznavanie livney i grada po izmereniyam uhodyashchego teplovogo izlucheniya zemli so sputnika NOAA. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2004, no. 1, pp. 387-392 [in Russ.].
5. *Alekseeva A.A., Bukharov M.V., Losev V.M., and Solov'ev V.I.* Diagnosis of Precipitation and Thunderstorms from Measurements of Outgoing Heat Radiation of a Cloud Cover from Geostationary Satellites. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2006, vol. 31, no. 8, pp. 20-26.
6. *Alekseeva A.A., Glushkova N.I.* Sposob prognoza stihyinykh konvektivnykh gidrometeorologicheskikh yavleniy teplogo perioda: Patent na izobretenie RUS 2162237. *Byull. izobr.* № 2 ot 20.01.2001 [in Russ.].
7. *Alekseeva A. A.* Forecast of heavy summer precipitation based on the output of a regional model of the Hydrometcenter of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 43-63 [in Russ.].
8. *Alekseeva A.A., Peskov B.E.* Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 135-148 [in Russ.].
9. *Bukharov M.V., Alekseeva A.A.* Sposob opredeleniya parametrov atmosferynykh yavleniy v rayonah s oblachnym pokrovom [Method for determining parameters of atmospheric phenomena in areas with cloud cover. Patent na izobretenie RUS 2323459 02.04.2004 [in Russ.].
10. *Bukharov M.V., Solov'ev V.I., Alekseeva A.A., Losev V.M.* *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2006, no. 3, Vol. 1, pp. 77-82 [in Russ.].
11. *Bukharov M.V., Kukharskii A.V., Misnik L.A.* Automated work place "Planeta-Meteobzor" for monitoring hazardous weather associated with convective clouds. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, pp. 102-105. DOI: 10.3103/S1068373908020064.

12. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 363, pp. 101-119. [in Russ.].

13. Vasil'ev E.V., Alekseeva A.A., Peskov B.E. Conditions for formation and short-range forecasting of severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 1, pp. 1-7. DOI: 10.3103/S1068373909010014.

14. Glushkova N.I. Fizicheskie usloviya formirovaniya moshchnykh kuchevo-dozhdevykh oblakov i yavleniy, svyazannykh s nimi (groz, grada i livnya). *Trudy Gidromettsentra SSSR* [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR], 1974, vol. 136, pp. 12-16 [in Russ.].

15. Glushkova N.I. Issledovanie vzaimosvyazi mezhdu razlichnymi parametrami oblaka i atmosfery pri vypadenii livney i grada. *Trudy Gidromettsentra SSSR* [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR], 1978, vol. 201, pp. 38-46 [in Russ.].

16. Glushkova N.I. Ob usovershenstvovanii prognozov livnevnykh osadkov i razmera grada s ispol'zovaniem radiolokatsionnykh dannykh. *Trudy Gidromettsentra SSSR* [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR], 1978, vol. 201, pp. 51-56 [in Russ.].

17. Glushkova N.I. Prognoz osadkov po dannym sputnikovyykh i radiolokatsionnykh nablyudeniy. *Trudy Gidromettsentra SSSR* [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR], 1985, vol. 266, pp. 21-33 [in Russ.].

18. Donaldson R.J.Jr., Chmela A.C. Distribution of Vertical Velocity Mean and Variance in a Thunderstorm. *Proc. 13th Radar Meteorology Conf.*, Montreal, 1968, pp. 492-497.

19. Kalinin N.A. Monitoring, modelirovaniye i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shiroтах. Perm': Perm State University, 2015, 308 p. [in Russ.].

20. Lebedeva N.V. Postroyeniye modeli konvekcii i raschet kolichestva livnevnykh osadkov. *Trudy CIP*, 1954, vol. 31, no. 58, pp. 3-30 [in Russ.].

21. Losev V.M. Regional'naya gidrodinamicheskaya model' prognoza Gidromettsentra Rossii. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 36-58 [in Russ.].

22. Otchet o vypolnenii nauchno-issledovatel'skoy raboty Gosudarstvennogo nauchnogo centra Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossiyskoy Federatsii. Modelirovaniye regional'nykh processov i razvitiye metodov prognozov neblagopriyatnykh gidrometeorologicheskikh yavleniy. № gos. registratsii 01200212070, Moscow, 2002 [in Russ.].

23. Perekhodceva E.V. Prognoz sil'nykh shkvalov i smerchey v letniy period 2009 goda na osnove statisticheskikh modeley. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2010, vol. 344, pp. 265-279 [in Russ.].

24. Perekhodtseva E.V. On the hydrodynamic-statistical forecast of strong wind and heavy precipitation phenomena for two days ahead over the North Caucasus territory. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2012, vol. 347, pp. 101-111 [in Russ.].

25. Peskov B.E. Issledovanie usloviy razvitiya groz i shkvalov s pomoshch'yu diagnosticheskikh diagramm veroyatnosti i indeksov neustoychivosti. *Trudy Gidromettsentra SSSR* [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR], 1967, vol. 13, pp. 21-31 [in Russ.].

26. Petersen S. Analiz i prognoz pogody [Analysis and weather forecast]. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1961, 652 p. [in Russ.].

27. Programma rascheta maksimal'nykh skorostey konvektivnykh dvizheniy po dannym seti doplerovskikh lokatorov DMRL-S: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy EVM № 2019662109 ot 17.09.2019 [in Russ.].

28. RD 52.27.339-93. Rukovodstvo po diagnozu i prognozu opasnykh i osobo opasnykh osadkov, grada i shkvalov po dannym meteorologicheskikh radiolokatorov I iskusstvennykh sputnikov Zemli. Moscow, ROSGIDROMET, 1996, 181 p. [in Russ.].

29. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Chast' 1. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 702 p. [in Russ.].

30. Sprygin A.A., Prokharenaya M.I. Diagnosis and forecasting of convective structures accompanied by severe weather events based on model and remote sensing data over the territory of Belarus and central Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], vol. 369, no. 3, pp. 2-22 [in Russ.].

31. Sulakvelidze G.K., Glushkova N.I., Fedchenko L.M. Prognoz groz, grada i livnevnyh osadkov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1970, 188 p. [in Russ.].
32. Haltiner J. Dinamicheskaya i fizicheskaya meteorologiya [Dynamic and physical meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1961, 435 p. [in Russ.].
33. Shishkin N.S. Oblaka, osadki i grozovoe elektrichestvo. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1964, 351 p. [in Russ.].
34. Shmeter S.M., Silaeva V.I. Vertikal'nye potoki vnutri kuchevo-dozhdevykh oblakov *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. *Meteorol. Hydrol.*], 1966, no. 10, pp. 7-13 [in Russ.].
35. Bjerknes J. Saturated-adiabatic ascent of air through dry-adiabatically descending environment. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, 1938, vol. 64, no. 275.

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

Received by the editor 18.03.2019.

УДК 551.515.6

Анализ быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции по картам спутникового диагноза

М.В. Бухаров¹, В.М. Бухаров²

*¹Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии
«Планета», Москва, Россия;*

*²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
rprogn@mail.ru*

Рассмотрено применение карт спутникового диагноза для анализа свойств быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции. По этим картам установлено, что диаметр внезапно возникшей почти круглой облачности вблизи Неаполя 5 сентября 2015 г. за 3 часа вырос до 300 км и продолжал быстро расти, а на его периферии распознавалось упорядоченное в виде кольца скопление суперячейковых грозоградовых облаков. Это позволило назвать такую систему быстро растущим мезомасштабным конвективным комплексом суперячейковых облаков (МККСО). Проведен анализ фаз развития и получены оценки средней скорости вертикальных восходящих движений в МККСО, скоростей роста его диаметра и переноса.

Ключевые слова: карты спутникового диагноза, суперячейковые облака, мезомасштабный конвективный комплекс, грозы, град в облаках, шквалы

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-23-38>

Analysis of the rapidly growing mesoscale system of deep convection on satellite maps of the diagnosis

M.V. Bukharov¹, V.M. Bukharov²

¹State Research Center "Planeta, Moscow, Russia;

*²Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
rprogn@mail.ru*

The application of satellite maps of the diagnosis for the analysis of the properties of the rapidly growing mesoscale system of deep convection is considered. Satellite maps of diagnosis found that the diameter of the round almost suddenly arisen cloud rose to 300 km for 3 hours and has continued to grow rapidly, and at its periphery is recognized as an ordered ringcluster supercells thunderstorm clouds. This allowed us to call such a system rapidly growing mesoscale supercells complex convective clouds (MCCSC). Analysis of the development phases and high vertical speed estimates upward movements in MCCSC, speeds growth its diameter and transfer.

Keywords: satellite maps of diagnosis, supercells clouds mesoscale convective complex, thunderstorms, hail, clouds, gusts

Введение

Взрывной характер возникновения и быстрое развитие скоплений грозоопасных и градоопасных кучево-дождевых облаков, сопровождающихся сильными ливнями и шквалами, представляет большую опасность для хозяйственной деятельности и нередко – жизни людей. Как правило, такие явления связаны с мезомасштабными системами глубокой конвекции. Для уточнения времени и места возникновения таких мезомасштабных систем, их эволюции и скорости перемещения традиционно используется радиолокационная и спутниковая информация, а также данные метеорологической сети наблюдений.

В последнее десятилетие для метеорологического обслуживания авиации специалисты Московского авиационного узла стали использовать карты автоматизированного спутникового диагноза, создаваемые в ФГБУ «НИЦ «Планета» [6] на основе алгоритмов диагноза метеорологических элементов, параметров конвекции и связанных с ней опасных конвективных явлений погоды и их интенсивности, разработанных совместно с сотрудниками ФГБУ «Гидрометцентр России» [2, 3]. Карты спутникового диагноза создаются в реальном режиме времени с периодичностью спутниковой съемки 15 и 30 минут. Используются измерения с геостационарных спутников Meteosat. Кроме того, в разработанных алгоритмах диагноза спутниковая информация комплексирована с прогностическими модельными данными, специально сопряженными по пространственному разрешению со спутниковой информацией [10]. Используются прогностические вертикальные профили температуры, влажности и скорости ветра, а также поля приземного давления в Гидродинамической модели регионального прогноза (ГМРП) с ежечасной дискретностью со сроков расчета в 00 и 12 ч ВСВ с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Интерполяция модельных данных на момент спутниковой съемки (с дискретностью 15 и 30 минут) осуществляется по ближайшим ежечасным прогностическим данным.

Описание и примеры карт спутникового диагноза, выпускаемых в настоящее время для территории России, а также информация о точности диагноза разных параметров доступны на сайте виртуальной лаборатории дистанционного обучения спутниковой гидрометеорологии ИПК Росгидромета [http://meteovlab.meteor.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=900&Itemid=206&lang=ru] и в работах [7, 8].

Специализированные карты автоматизированного спутникового диагноза опасных для авиации метеоусловий на территории России, передаваемые в реальном времени на автоматизированное рабочее место (АРМ) руководителей полетов и АРМ метеорологов, используются уже более 10 лет. За это время перечень диагностированных характеристик в АРМ существенно расширился. Рассматриваемые в данной статье диагностические карты являются составной частью комплекта создаваемых карт.

Карты спутникового диагноза позволяют оперативно оценить вероятность гроз, града в облаках, интенсивность осадков, максимальную скорость ветра при порывах у земли и ряд других параметров [2–5]. Пространственное разрешение таких карт близко к 10 км, а в географической привязке облачности исключены погрешности (в виде параллакса), имеющиеся в исходных спутниковых снимках [8].

Практика применения карт показала, что они полезны не только для оперативного предупреждения о районах возможного возникновения опасных атмосферных явлений, но и для получения дополнительных сведений о свойствах и эволюции Сб в мезомасштабных системах глубокой конвекции. Представления о свойствах одноячейковых, многоячейковых и наиболее опасных суперячейковых кучево-дождевых облаков, а также их скоплений разного пространственного масштаба формировались на основе спутниковых и радиолокационных измерений, представленных, например, в [1, 9, 11, 13].

Спецификой измерений метеорологических радиолокаторов является ограниченность по дальности обнаружения облаков разной мощности и существенное затухание излучения в ливневых осадках [13]. Спутниковые данные в синоптической практике до недавнего времени использовались только в виде снимков облачности.

До сих пор прогноз взрывных быстроразвивающихся конвективных процессов для целей превентивного принятия мер защиты остается не до конца решенной задачей. Поэтому не потеряли актуальности исследования закономерности развития и пространственного упорядочивания Сб в системах глубокой конвекции, пространственный масштаб циркуляции в которых быстро изменяется.

Согласно классификации Р.А. Мэддокса [9], облачные системы глубокой конвекции близки к системам симметричного типа; их принято разделять на два класса: скопления кучево-дождевых облаков β -мезомасштаба (20–200 км) и мезомасштабные конвективные комплексы (МКК) α -мезомасштаба (200–2000 км). На основе анализа карт спутникового диагноза выделен еще и подкласс опасных МКК с суперячейковыми облаками (МККСО). Их особенностью является внезапное возникновение, быстрый рост диаметра облачности (от ~60 до 400 км и более за несколько часов), большая скорость переноса и кольцообразное расположение суперячейковых облаков по периферии облачности МККСО, имеющей по виду на снимках облачности с ИСЗ почти округлую или овальную форму с резко очерченными границами.

В данном исследовании проведен анализ отдельного случая МККСО с целью получения новых знаний об их свойствах с использованием спутниковых данных о радиационной температуре, а также разработанных карт диагностированных параметров конвекции, метеорологических явлений и их интенсивности.

1. Свойства грозоградовых облаков

Кратко остановимся на известных представлениях о свойствах опасных грозоградовых облаков. Информация об облачности – ее форме, активности, эволюции – является надежным индикатором состояния атмосферы. Согласно [2, 3, 5], зоны активной конвекции (ЗАК), с которыми связаны конвективные явления погоды в грациях неблагоприятных (НЯ) и опасных (ОЯ) явлений погоды, имеют на спутниковых снимках облачности площадь, ограниченную изотермой радиационной температуры -30°C , размеры которой в диаметре не превышают 400 км. Внутри такой зоны обязательно отмечаются очаги с температурой ниже -45°C , причем очагам с более низкой температурой соответствуют явления большей интенсивности; горизонтальный градиент радиационной температуры по контуру очага в этих случаях составляет более $20^{\circ}\text{C}/150\text{ км}$. В случае анализа снимков облачности с ИСЗ такие скопления кучево-дождевых облаков представляют собой округлые яркие области, изолированные или выделяющиеся на фоне облачности атмосферных фронтов. Такие ЗАК могут состоять из одноячейковых, многоячейковых и суперячейковых грозоградовых облаков.

Одноячейковые облака возникают в малоградиентных барических полях, состоят из нескольких малоподвижных или перемещающихся, подчиняясь локальным циркуляциям, конвективных ячеек с поперечными размерами 5–20 км, временем жизни 30–50 мин, максимальной высотой верхней границы облаков (Нвго) до 8 км и с малыми сдвигами ветра.

Многоячейковые облака состоят из 2–4 конвективных ячеек размером 20–40 км и Нвго ~ 10 –14 км. Максимальная скорость восходящих потоков в таких ячейках может достигать 20–30 м/с, а их время жизни составляет около 10–20 мин. Образуются такие облака при умеренных и сильных ветрах в тропосфере с умеренным вертикальным сдвигом ветра.

Суперячейковые облака возникают из нескольких конвективных ячеек, имеют протяженность 20–40 км, Нвго ~ 12 –15 км и время жизни от одного до нескольких часов. Такие облака имеют длительно существующую обширную зону (5–15 км) мощного ламинарного восходящего потока (максимальная скорость до 20–40 м/с), который проникает до высоты 8–10 км и смещается со скоростью 25–40 км/ч. Диаметр выпадающего града может достигать 5–10 см.

Согласно [13], при возникновении суперячейковых облаков наблюдаются средние и сильные по величине сдвиги ветра. Большие сдвиги ветра являются причиной, упорядочивающей внутриоблачную циркуляцию благодаря разделению восходящего и нисходящего потоков. В нижнем слое ветер имеет правый поворот с высотой.

Проанализируем свойства облаков по картам спутникового диагноза, рассмотрим для случая развития МККСО 5 сентября 2015 г., когда на Неаполь и близлежащие города обрушилась и бушевала в течение

получаса сильная гроза с аномально крупным градом (до 5–10 см в диаметре), сильным ливнем и ветром. От разбушевавшейся стихии массово пострадали автомобили, здания и сооружения, не успевшие спрятаться жители и животные, повалены деревья. Фермеры сообщали об огромных убытках: град практически полностью уничтожил урожай. Это был самый крупный град в этом районе за последние 20 лет. В некоторых местах градина не могла уместиться в ладони взрослого человека.

К процессам такой разрушительной силы привело скопление конвективной облачности на активном атмосферном фронте над акваторией Средиземного моря, которое образовалось утром 5 сентября и двинулось на Италию, накрыв Неаполь и близлежащие территории. Для анализа воспользуемся картами спутникового диагноза, фрагменты которых представлены на рис. 1. Съемка с Meteosat-10 проведена 5 сентября 2015 г. в 8.00 ч ВСВ.

На фрагментах карт на рис. 1а, б, г нанесены изобары (белые линии) через 2 гПа, на рис. 1а, б, в указано направление переноса атмосферы на уровне 500 гПа (черные стрелки). На рис. 1г отмечено направление ветра (синие стрелки), а также проведены изотермы температуры воздуха у земли через 5 °С (коричневые линии). Границы облачности, высота верхней границы которой (Нвго) превышает 6 км, на рис. 1в для наглядности обведены белыми линиями, черными изолиниями через 2 дкм нанесены изогипсы поверхности 500 гПа.

Отмеченная на рис. 1 ситуация рассчитана на момент спутниковой съемки по выходным модельным данным [10], т. е. на рис. 1 приведены результаты комплексирования прогнозируемых модельных и диагностируемых спутниковых данных.

По фрагменту карты радиационной температуры (рис. 1а) видно, что в момент съемки над центральной Италией располагался МКК, который имел почти округлую форму диаметром ~160 км (масштаб мезо-β [9]). Он располагался на периферии слабо выраженной ложбины (изобара 1012 гПа) в малоградиентном барическом поле, а радиационная температура (Тр) на верхней границе облачности оказалась меньше -60 °С.

На карте спутникового диагноза метеорологических явлений (рис. 1б) заметно упорядоченное скопление грозоградовых облаков по периферии МКК в виде кольца, Нвго этих облаков достигала 14–15 км (рис. 1в), а у земли имели место локальные усиления ветра до 20–27 м/с (рис. 1г).

По данным радиолокационных наблюдений было установлено [11, 13], что при достижении Нвго ~14–15 км грозоградовые облака являются суперячейковыми, для которых типичны грозы, град, ливни и шквалы. Поэтому рассмотренную систему глубокой конвекции (рис. 1) β-мезомасштаба, в которой доминируют кольцеобразно упорядоченные скопления суперячейковых облаков, в момент спутниковой съемки (8.00 ч ВСВ) можно отнести к подклассу МККСО [9].

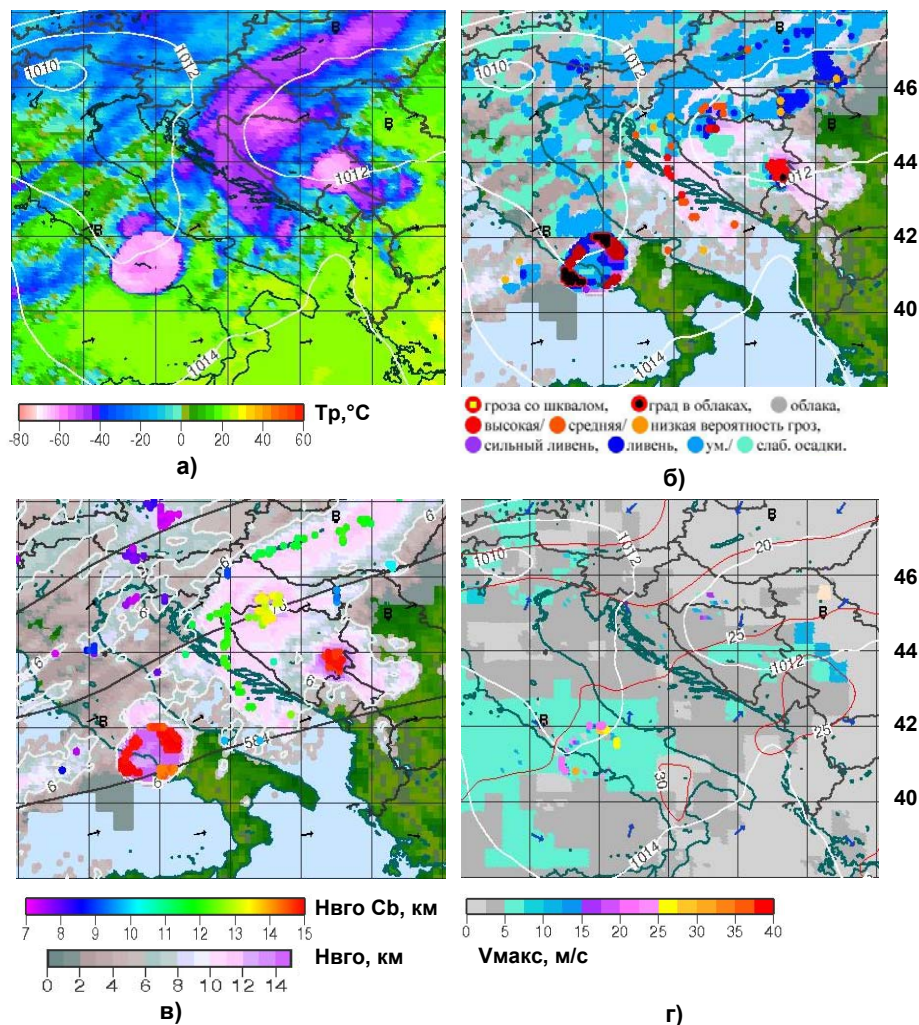


Рис. 1. Фрагменты карт радиационной температуры (а); метеорологических явлений (б); высоты верхней границы Сб облаков (в); максимальной скорости ветра (г) в районе МККСО над центральной Италией. Съемка ИСЗ Meteosat-10, 05.09.2015, 08.00 ч ВСУ.

Fig. 1. Fragments of radiation temperature maps (a), meteorological phenomena (б), cloud upper boundary height Сb (в) and maximum wind speed (г) in the ICCS area over central Italy. The survey was conducted on 05.09.2015 at 08.00 UTC in Meteosat-10.

Для получения представлений о метеорологических условиях в центральной части исследуемого МККСО, проанализируем графики модельных вертикальных профилей температуры воздуха, ее вертикального градиента, скорости и направления ветра, рассчитанных по данным ГМРП на момент спутниковой съемки с заблаговременностью 8 ч (рис. 2).

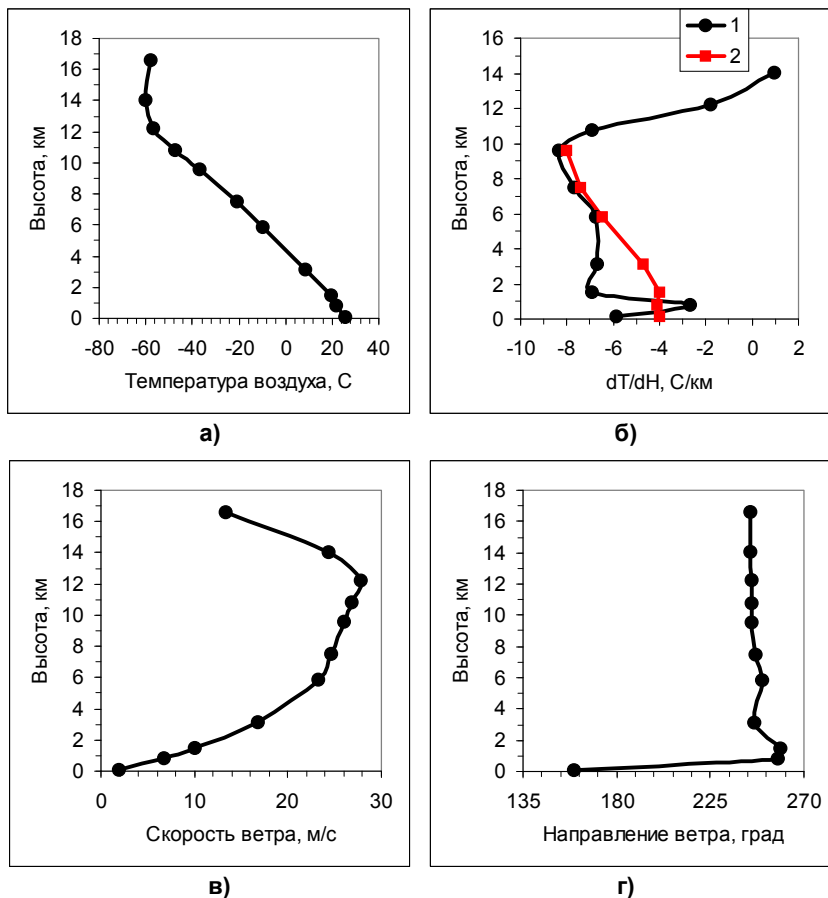


Рис. 2. Графики изменения с высотой температуры воздуха (а), вертикального градиента температуры (б), скорости (в) и направления (г) ветра в центральной части МККСО по данным ГМРП за 05 сентября 2015 г. в 08.00 ВСВ. 1 – вертикальный градиент температуры; 2 – влажноадиабатический градиент.

Fig. 2. Vertical temperature profile (а), vertical temperature gradient (б), wind velocity (в) and wind direction (г) in the central part of ICSE according to the data of GMRP for September 05, 2015 at 08.00 UTC. Prognostic (1) and humid adiabatic (2) vertical temperature gradients.

Согласно графику вертикального профиля температуры воздуха (рис. 2а), высота тропопаузы в районе МККСО составила ~12 км. Сравнение влажноадиабатического градиента (кривая 2 на рис. 2б) с вертикальным градиентом температуры (критерии неустойчивости взяты из [11]), показывает, что влажнестойчивыми (разница между значениями на кривых 1–3 °С) оказались слои тропосферы, расположенные в диапазоне высот 0–1 км и 1,5–6 км. При такой неустойчивости средняя вертикальная скорость восходящих движений в МККСО может быть близка к 5 м/с [12].

До высоты 6 км в атмосфере прогнозировался сильный сдвиг ветра, а выше 6 км меньшее изменение скорости ветра с высотой (рис. 2в) и слабое изменение его направления (рис. 2г). Максимальная скорость ветра (около 27 м/с) по модельным данным ожидалась на высоте около 12 км (рис. 2в). В диапазоне высот от 2 до 4 км, где неустойчивость атмосферы оказалась наибольшей, скорость прогнозируемого ветра монотонно возрастала от 12 до 19 м/с, а направление менялось слабо. В самом нижнем слое тропосферы до высоты примерно 2 км (рис. 2г) прогнозировался правый (по часовой стрелке) поворот ветра с высотой (примерно на 100°).

Вышеперечисленные спрогнозированные метеорологические условия являются типичными для существования суперячейковых облаков [13]. Поэтому наличие суперячейковых облаков, Нвго которых близка к 15 км, может являться основным критерием мезомасштабных систем глубокой конвекции осесимметричного типа, рассматриваемых в качестве МККСО.

Далее оценим минимальный горизонтальный размер скоплений кучево-дождевых облаков, при котором растущую систему глубокой конвекции, наблюдающуюся на картах спутникового диагноза, можно отнести к подклассу МККСО, также рассмотрим динамику развития облачности и изменения ее свойств.

2. Динамика свойств быстро растущего МККСО

2.1. Фазы развития МККСО

Для анализа воспользуемся выборкой фрагментов из четырех карт спутникового диагноза (радиационной температуры, диагностированных метеорологических явлений, высоты верхней границы кучево-дождевых облаков и максимальной скорости ветра) в районе МККСО над центральной Италией 5.09.2015 г., представленных на рис. 3. Выборка сделана с детализацией по времени 15 мин в период с 6.45 до 9.00 ч ВСВ.

Анализ фрагментов карт радиационной температуры (Тр) (рис. 3а), метеорологических явлений (рис. 3б), высоты верхней границы (Нвго) Сб (рис. 3в) и максимальной скорости ветра у земли (Vмакс) (рис. 3г), а также всей последовательности карт спутникового диагноза, построенных в рассмотренный период времени, показал наличие четырех фаз в развитии МККСО.

1. *Возникновение первого суперячейкового облака* наблюдалось в течении 15 мин после того, как на северо-восточной периферии слабой депрессии (1012 гПа) в 6.15 ч ВСВ над морем появилось первое многоячейковое облако (Тр $\sim -50^\circ\text{C}$, Нвго ~ 10 км, диагностировалась низкая вероятность грозы, Vмакс ~ 18 м/с). К 6.30 ВСВ это многоячейковое облако превратилось в суперячейковое (Тр $\sim -65^\circ\text{C}$, Нвго $\sim 14,5$ км, диагностировалась высокая вероятность гроз с градом в облаке, Vмакс ~ 4 м/с), а впереди (по направлению переноса) появилось еще два многоячейковых облака, распознаваемых по Нвго ~ 10 и $12,5$ км.

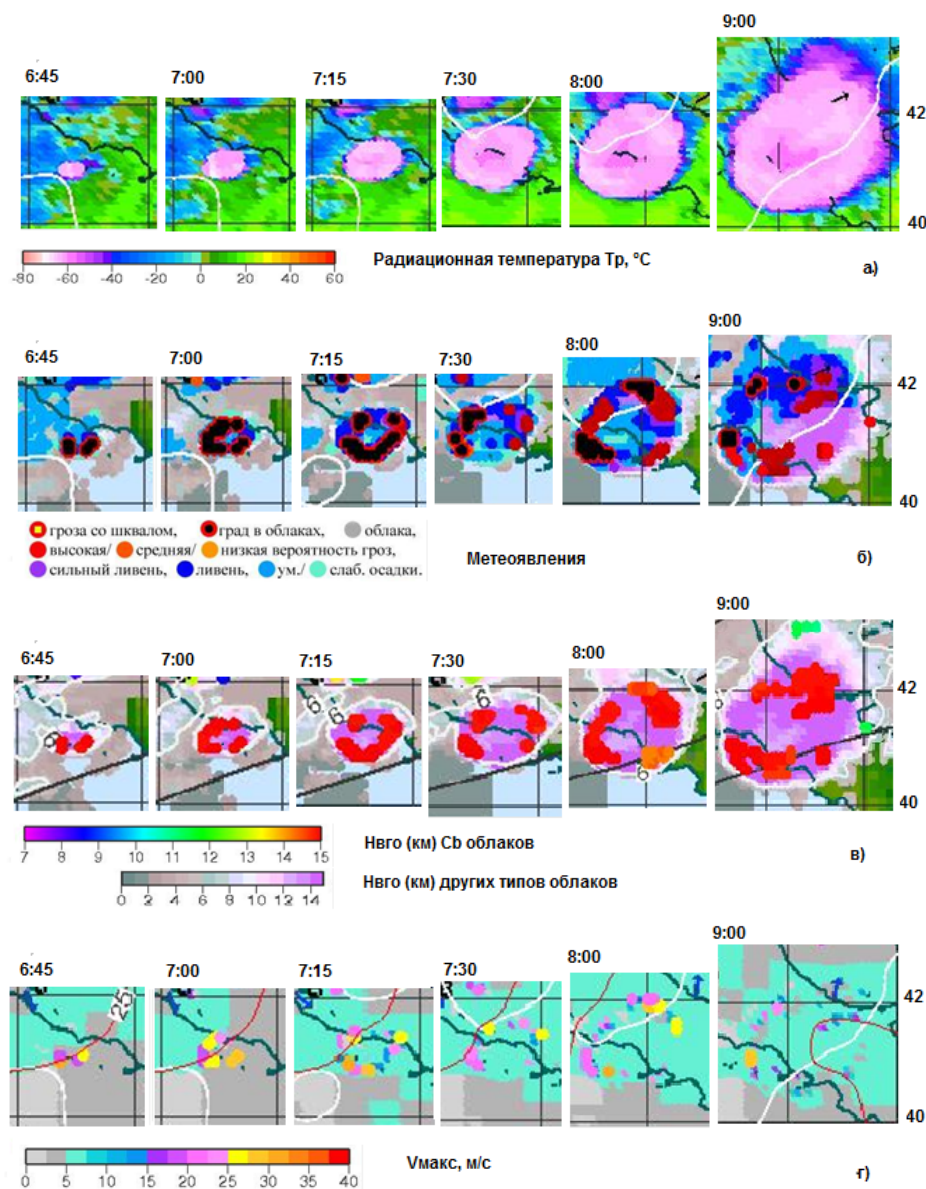


Рис. 3. Фрагменты карт радиационной температуры (а) и диагностированных метеорологических явлений (б), высоты верхней границы кучево-дождевых облаков (в) и максимальной скорости ветра (г) в районе МККСО над центральной Италией. Съемка ИСЗ Meteosat-10, 05.09.2015, 6.45, 7.00, 7.15, 7.30, 8.00 и 9.00 ч BCY.

Fig. 3. Fragments of radiation temperature maps (а) and diagnosed meteorological phenomena (б), Cb top height (в) and the maximum wind speed (г) in the ICCS area over central Italy. The survey was held on September 05, 2015 at 6.45, 7.00, 7.15, 7.30, 8.00 and 9.00 UTC with Meteosat-10.

2. **Возникновение МККСО** распознано в последующие 30 мин наблюдений (6.45 – 7.15 ч ВСВ). Сначала в 6.45 ВСВ образовалось скопление из двух суперячейковых облаков (рис. 3б, в, г) с Нвго ~15 км, которые имели общую облачность (рис. 3а) почти округлой формы с диаметром ~60 км. К 7.00 ВСВ (рис. 3б, в, г) количество скоплений из суперячейковых Сб (с диагностированными грозами, градом в облаках и шквалами) резко возросло, и они образовали почти сплошное кольцо, которое охватило всю периферийную часть облачности МККСО. При этом наименьшие значения T_r в скоплениях Сб были ниже -65°C (рис. 3а), Нвго достигала ~15 км (рис. 3в), а горизонтальная протяженность Сб составляла примерно 15–30 км.

Момент времени, когда первые суперячейковые Сб образовали скопление с явно выраженным упорядочением на периферии облачности округлой формы (рис. 3б, 6.45 ч ВСВ), можно рассматривать как момент возникновения МККСО диаметром ~60 км (β -мезомасштаб, [9]). В таком МККСО одновременно возможны доминирующая закрытая (создающая облачность округлой формы на рис. 3а) и открытая (в виде кольцеобразного расположения суперячейковых облаков на рис. 3б, в) конвективные циркуляции.

3. **Быстрый рост диаметра МККСО.** В последующие два часа (с 7.15 до 9.30 ч ВСВ) продолжался быстрый рост диаметра округлой облачности МККСО, который увеличился со 110 км в 7.15 ВСВ до ~280 км (α -мезомасштаб) к 9.00 ч ВСВ (рис. 3а). Примерно так же рос и внешний диаметр кольцеобразного скопления суперячейковых облаков (Нвго ~15 км), во многих из которых продолжали распознаваться грозы с градом в облаках и ливни (рис. 3б), а также возможность возникновения шквалов (рис. 3г).

Особенностью этой фазы является появление быстро меняющихся больших разрывов в кольцеобразном упорядочивании суперячейковых облаков на периферии МККСО, а также существенная неустойчивость размеров их локальных скоплений и расположения на периферии быстро растущей облачности почти округлой формы.

4. **Уменьшение активности МККСО.** В период примерно с 10.00 до 12.00 ч ВСВ и позднее облачность МККСО стала заметно вытягиваться в направлении переноса на северо-восток, а активность суперячейковых облаков и их скоплений – ощутимо убывать, хотя еще и продолжала диагностироваться высокая вероятность гроз.

2.2. Динамика скоростей конвекции, роста и смещения МККСО

Упрощенную оценку средней вертикальной скорости конвекции в МККСО можно сделать в предположении, что весь объем воздуха, выносимого вверх под влиянием закрытой конвективной циркуляции МККСО, равномерно распределяется по его внешней периферии, обеспечивая рост

радиуса почти округлой облачности МККСО. Количественно это условие можно записать в следующем виде:

$$W_K \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \approx V_R \cdot \pi \cdot D \cdot H, \quad (1)$$

где W_K – средняя (по МККСО) вертикальная скорость конвекции; V_R – средняя (по МККСО) скорость роста радиуса округлой облачности МККСО; D и H – диаметр и высота верхней границы облачности МККСО соответственно. При этом $H \approx 15$ км (высота верхней границы Сб), а значения D и V_R можно оценить по картам радиационной температуры, которые представлены на рис. 3а.

Отметим, что заметный вклад в среднее значение W_K в МККСО, по-видимому, могут давать и обширные (5–15 км) зоны мощных ламинарных восходящих потоков со скоростями до 20–40 м/с, возникающие в каждом суперячейковом облаке [11, 13].

После преобразования соотношения (1) для оценки W_K получаем следующее выражение:

$$W_K \approx 4H \cdot V_R / D. \quad (2)$$

Для получения количественных представлений о значениях диаметра облачности МККСО, радиальной скорости его роста, а также о средней вертикальной скорости конвекции и скорости переноса МКК, обратимся к рис. 4.

На рис. 4а видно, что с момента возникновения первого суперячейкового (Нвго ~ 14 –15 км) облака в 6.15 ч ВСВ, диаметр облачности МККСО (кривая 1) в течение первых двух часов быстро увеличился с ~ 30 до 200 км, а в следующие 3 часа вырос уже до 400 км. При этом смещение центра МККСО (относительно места его возникновения) за 2 часа составило ~ 125 км (кривая 2 на рис. 4а), а за 5 часов достигло 320 км.

Скорость роста диаметра МККСО в первый час после возникновения облачности МККСО оказалась максимальной (~ 110 км/ч, кривая 1 на рис. 4б), а в последующие часы несколько уменьшилась (до 80 км/ч). При этом некоторая немонотонность скорости роста диаметра МККСО возникла через 2 ч 45 мин, когда в его закрытую циркуляцию был вовлечен и поглощен облачный массив, автономно развивавшийся к северу от МККСО. Процесс вовлечения хорошо виден на последовательности фрагментов карт рис. 3а, построенных в 7.30, 8.00 и 9.00 ч ВСВ.

Рассчитанная по формуле (2) средняя вертикальная скорость конвекции оказалась максимальной (~ 34 м/с на рис. 4в) в момент возникновения первого суперячейкового Сб, что согласуется с известными радиолокационными наблюдениями [11, 13]. В момент возникновения МККСО значение W_K резко уменьшилось до 17 м/с, а в процессе роста диаметра МККСО величина W_K монотонно убывала до 5 м/с и далее до 2 м/с

при $D \sim 160$ и 400 км соответственно. Причем значение $W_k \sim 5$, рассчитанное по формуле (2) для $D \sim 160$ км (в 8.00 ч ВСВ, рис. 1а), совпадает с его оценкой, независимо сделанной выше по величине влажноадиабатической неустойчивости тропосферы (рис. 2б) в центральной части МККСО.

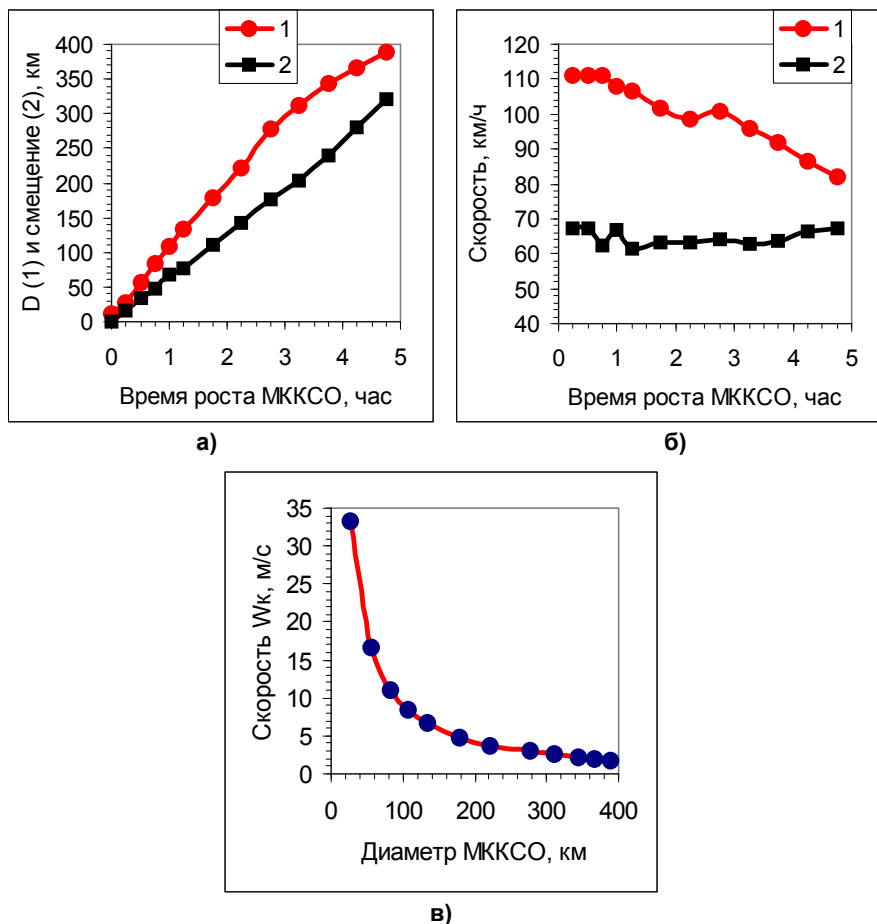


Рис. 4. Графики изменения со временем диаметра D (а, кривая 1) облачности МККСО, смещения (а, кривая 2) его центра относительно пункта возникновения, а также скорости роста диаметра (б, кривая 1), скорости смещения (б, кривая 2) центра МККСО и оценочной средней вертикальной скорости конвекции в МККСО при его разном диаметре (в). Время роста МККСО, равное нулю, соответствует 06.15 ВСВ 05 сентября 2015 г.

Fig. 4. Graphs of change with time of diameter D (а-1) of cloud of ICCS, displacement (а-2) of its center relative to initiation place, as well as speed of diameter growth (б-1), speed of displacement (б-2) of center of ICCS and estimated average vertical velocity of convection in ICCS at its different diameter (в). The ICCS growth time of zero corresponds to 06.15 UTC on September 05, 2015.

Отметим, что с ростом диаметра МККСО уменьшение значений W_k сопровождалось ростом неустойчивости пространственной структуры упорядочивания и появления дополнительных скоплений суперячейковых облаков в МККСО, что видно на рис. 3б, в.

Средняя скорость смещения центра МККСО в рассмотренный период времени оказалась близкой к 65 км/ч, или 18 м/с (кривая 2 на рис. 4б), и слабо изменялась (в пределах ± 3 км/ч). Согласно рис. 2в, такие значения могли наблюдаться на высоте $\sim 3,5$ км, которая близка к высоте нулевой изотермы (рис. 2а) и где возможна большая влажноadiaбатическая неустойчивость атмосферы (рис. 2б).

При радиальной скорости роста МККСО, близкой к 55 км/ч, получаем, что передняя (или северо-восточная) граница МККСО смещалась с максимальной скоростью, близкой к 120 км/ч, а задняя (ЮЗ) граница – с минимальной скоростью ~ 10 км/ч. Из-за этого задняя граница МККСО длительное время оказывалась как бы «привязана» к месту возникновения МККСО.

Обобщая результаты анализа, можно сформулировать следующим образом основную закономерность динамики развития МККСО, обнаруженную по картам спутникового диагноза.

Локальные восходящие потоки тепла и влаги, существующие в отдельных суперячейковых облаках и их скоплениях, могут провоцировать возникновение МККСО и подпитывать его развитие от размера β -мезомасштаба до α -мезомасштаба. При этом закрытая конвективная циркуляция в МККСО, со своей стороны, стимулирует возникновение суперячейковых Сб в основном на периферии облачности МККСО, поскольку только там имеются условия для усиления нисходящих и связанных с ними восходящих вертикальных движений. Обнаруженные свойства МККСО позволяют рассматривать его в качестве подкласса облачных систем глубокой конвекции осесимметричного типа, размер которых быстро изменяется от β - до α -мезомасштаба.

Другой случай анализа карт спутникового диагноза за 29 августа 2014 г. показал, что именно вблизи резкой границы облачной шапки МККСО могут возникать не только шквалы, но и такое разрушительное явление, как смерч, который в этот день наблюдался в Башкирии [5].

Выводы

Рассмотрено применение карт спутникового диагноза для анализа свойств быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции. При распознавании одноячейковых, многоячейковых и суперячейковых грозоградовых облаков использованы известные данные наблюдений метеорологических радиолокаторов о высоте их верхней границы и поперечных размерах. По картам спутникового диагноза установлено, что

диаметр внезапно возникшей облачности почти округлой формы за 3 часа вырос до 300 км и продолжал быстро расти, а на ее периферии диагностировалось упорядоченное в виде кольца скопление суперячейковых грозо-градовых облаков. Быстрый рост диаметра МККСО создал проблему в применении к нему традиционной классификации масштабов (β - или α -мезомасштаба [9]), которая принята для облачных систем глубокой конвекции осесимметричного типа. Поэтому предложено выделить МККСО в подкласс редких быстро растущих мезомасштабных конвективных комплексов суперячейковых облаков.

По прогностическим модельным данным, рассчитанным на момент спутниковой съемки, проведен анализ вертикальных профилей температуры воздуха, ее вертикального градиента, скорости и направления ветра в центральной части МККСО. Отмечено, что значения этих параметров оказались типичными для районов существования суперячейковых облаков [12], что подтвердило справедливость их распознавания по картам спутникового диагноза.

Проведен анализ динамики изменения свойств быстро растущего МККСО в разных фазах его развития, начиная с возникновения первого суперячейкового облака и заканчивая уменьшением активности МККСО, когда еще продолжала диагностироваться высокая вероятность гроз. Отмечена устойчивая тенденция возникновения и упорядочивания суперячейковых облаков (Нвго ~ 15 км) в виде кольца на периферии почти округлой облачности МККСО в разные фазы его развития.

По значениям диаметра облачности МККСО, высоты ее верхней границы и радиальной скорости роста МККСО проведена количественная оценка динамики изменения средней вертикальной скорости конвекции, W_k , в МККСО. Установлено, что значение W_k оказалось максимальным (~ 34 м/с) в момент возникновения первого суперячейкового Сб и стало быстро уменьшаться с ростом диаметра облачности МККСО. Уменьшение W_k сопровождалось ростом неустойчивости кольцеобразного упорядочивания скоплений суперячейковых Сб на периферии и возникновением некоторых из них вблизи центральной области МККСО.

Показано, что распознавание МККСО стало возможным при использовании комплекса одновременно выпускаемых карт спутникового диагноза, который позволяет анализировать размеры облачности, распознавать районы с кучево-дождевыми облаками, оценивать высоту их верхней границы и дает представление о формировании грозо-градовых процессов.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения карт спутникового диагноза для дальнейшего изучения процессов возникновения и развития опасных атмосферных явлений, что важно при совершенствовании методов их прогнозирования и изучения пространственной структуры.

Список литературы

1. Абдуллаев С.М., Желнин А.А., Ленская О.Ю. Структура мезомасштабных конвективных систем в Центральной России // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 20-32.
2. Алексеева А.А., Бухаров М.В., Лосев В.М., Соловьев В.И. Диагноз осадков и гроз по измерениям уходящего теплового излучения облачности с геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2006. № 8. С. 33-42.
3. Бухаров М.В. Диагноз вероятности гроз по спутниковой информации // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С. 5-16.
4. Бухаров М.В. Применение карт спутникового диагноза для анализа условий обледенения ледяными кристаллами // Одиннадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2013 г. Тезисы докладов. С. 155.
5. Бухаров М.В., Дмитриева Т.Г., Миронова Н.С. Применение карт спутникового диагноза для анализа метеорологических условий при смерче в Башкирии 29 августа 2014 г. // Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 10–14 ноября 2014 г. Тезисы докладов. С. 169.
6. Бухаров М.В. Кухарский А.В., Мисник Л.А. Автоматизированное рабочее место «Планета-метеобзор» для мониторинга опасных атмосферных явлений, связанных с конвективной облачностью // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 64-69.
7. Бухаров М.В., Миронова Н.С., Сизенова Е.А. Анализ статистики соответствия между результатами автоматизированного распознавания осадков и гроз по информации с геостационарных спутников и наземными данными об этих явлениях // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2008. Т. 5, № 1. С. 424-428.
8. Бухаров М.В., Миронова Н.С., Ущехо И.Г. Методические вопросы верификации результатов автоматизированного распознавания осадков и гроз по информации с геостационарных спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 2, № 4. С. 40-45.
9. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М., 2006. 101 с.
10. Лосев В.М. Гидродинамическая конечно-разностная модель регионального прогноза на ЭВМ CRAY // Труды Гидрометцентра России. 2000. Вып. 334. С. 69-90.
11. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 2000. 779 с.
12. Приходько М.Г. Справочник инженера-синоптика. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 327 с.
13. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1980, 231 с.
14. Шихов А.Н., Быков А.В. Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 1, С. 137-148.

References

1. Abdullaev S.M., Zhelnin A.A., Lenskaya O.Y. The structure of mesoscale convective systems in central Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 1, pp. 12–20. DOI: 10.3103/S1068373912010025.
2. Alekseeva A. A., Bukharov M.V., Losev V.M., and Solov'ev V.I. Diagnosis of Precipitation and Thunderstorms from Measurements of Outgoing Heat Radiation of a Cloud Cover from Geostationary Satellites. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2006, vol. 31, no. 8, pp. 20-26.
3. Bukharov M.V. Satellite diagnosis of thunderstorm probability. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 8, pp. 515–521. DOI: 10.3103/S1068373913080013.
4. Bukharov M.V. Primenenie kart sputnikovogo diagnoza dlya analiza usloviy obledeneniya ledyanyimi kristallami // 11 Vserossiyskaya otkrytaya konferenciya «Sovremennye problemy

distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa», Moscow, IKI RAN, 11–15 noyabrya 2013. Tezisy dokladov. Moscow, 2013, pp. 155 [in Russ.].

5. Buharov M.V., Dmitrieva T.G., Mironova N.S. Primenenie kart sputnikovogo diagnoza dlya analiza meteorologicheskikh usloviy pri smerche v Bashkirii 29 avgusta 2014 g. 12 Vse-rossiyskaya otkrytaya konferenciya «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa», Moscow, IKI RAN, 10–14 noyabrya 2014. Tezisy dokladov. Moscow, 2014, 169 p. [in Russ.].

6. Buharov M.V., Kukharskii A.V., Misnik L.A. Automated work place “Planeta-Meteobzor” for monitoring hazardous weather associated with convective clouds. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, pp. 102–105. DOI: 10.3103/S1068373908020064.

7. Buharov M.V., Mironova N.S., Sizenova E.A. Analiz statistiki sootvetstviya mezhdu rezul'tatami avtomatizirovannogo raspoznavaniya osadkov i groz po informacii s geostacionarnykh sputnikov i nazemnymi dannymi ob etih yavleniyah. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2008, vol. 5, no. 1, pp. 424–428 [in Russ.].

8. Buharov M.V., Mironova N.S., Ushcheko I.G. Metodicheskie voprosy verifikatsii rezul'tatov avtomatizirovannogo raspoznavaniya osadkov i groz po informacii s geostacionarnykh sputnikov. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2007, vol. 2, no. 4, pp. 40–45 [in Russ.].

9. Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M. Mezometeorologicheskie processy. Moscow, 2006, 101 p. [in Russ.].

10. Losev V.M. Gidrodinamicheskaya konechno-raznostnaya model' regional'nogo prognoza na EVM CRAY. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2000, vol. 334, pp. 69–90 [in Russ.].

11. Matveev L.T. Fizika atmosfery [Atmospheric physics]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 2000, 779 p. [in Russ.].

12. Prihod'ko M.G. Spravochnik inzhenera-sinoptika. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 327 p. [in Russ.].

13. Rukovodstvo po primeneniyu radiolokatorov MRL-4, MRL-5 i MRL-6 v sisteme gradozashchity. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1980, 231 p. [in Russ.].

14. Shikhov A.N., Bykov A.V. Assessment of forecast quality of mesoscale convective systems in Western Urals region using WRF model and MODIS satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2016, vol. 13, no. 1, pp. 137–148 [in Russ.].

Поступила в редакцию 30.04.2019 г.

Received by the editor 30.04.2019.

УДК [551.576+551.558.1]:551.507.362.2

Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования

А.Е. Шишов, И.А. Горлач

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
ia_gorlach@mail.ru*

Измерения геостационарных метеорологических искусственных спутников Земли (МИСЗ) имеют большую ценность для мониторинга развития облачности глубокой конвекции (ОГК). Однако методы их обработки и возможности прогнозирования нельзя считать исчерпывающими. Цель данной статьи – описание нового алгоритма автоматизированного распознавания облачности глубокой конвекции и слежения за ее развитием на основе данных МИСЗ. На первом шаге алгоритма происходит распознавание объектов ОГК по пороговым значениям температуры; на втором шаге осуществляется поиск оптимального соответствия между распознанными объектами ОГК в последовательные моменты времени с помощью целочисленного программирования для оценки их смещения. Обосновывается преимущество предлагаемого алгоритма. Представлены результаты проверки качества его работы по данным за 11 и 12 июня 2019 года, когда над Европой и европейской частью России наблюдалось развитие мощной мезомасштабной конвективной системы. Характеристики распознанных объектов и их смещения соответствуют фактическим наблюдениям, что позволяет судить о корректности алгоритма.

Ключевые слова: искусственный спутник, облачность, распознавание, оптимизация, ассоциация, целочисленное программирование, трекинг, слежение

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-39-59>

An algorithm for the detection and tracking of deep convection using satellite data and integer programming

A.E. Shishov, I.A. Gorlach

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
ia_gorlach@mail.ru*

Data from geostationary satellites are of great value for monitoring the development of deep convection. However, contemporary methods for their processing and forecasting capabilities are still far from perfect. The objective of the present article is to propose a new convective cloud detection and tracking algorithm based on satellite data. At the first stage of the algorithm, individual deep convective cells or systems are detected by a temperature thresholding technique. At the second stage, clouds detected at two consecutive time steps are matched to estimate their displacement using integer programming. Furthermore, the authors explain the strengths of the proposed method as they compare it to existing alternatives. Its performance is evaluated in a case-study for June 11-12, 2019.

During this period, a strong mesoscale convective system was observed over Europe and the European part of Russia. The correspondence of the features of the detected clouds and their displacement to observations suggests that the proposed algorithm is correct.

Keywords: satellite, deep convection, clouds, object detection, optimization, association, integer programming, object tracking

Введение

Ввиду большого потенциального ущерба как благосостоянию общества, так и здоровью людей, опасные явления, возникающие в виде гроз, града, ураганов и ливней, сильных порывов ветра, привлекают особое внимание метеорологов.

Известно, что одним из основных источников опасных явлений погоды считается облачность определенного типа, а именно, мощная кучево-дождевая облачность, и скопления конвективных облаков. Облака достигают больших высот и характеризуются большой вертикальной протяженностью, их верхняя граница может достигать уровня тропопаузы и превышать его, что осложняет оперативные наблюдения за ее развитием с поверхности Земли.

В настоящее время краткосрочный прогноз локальных конвективных явлений осуществляется с помощью негидростатических мезомасштабных моделей атмосферы, способных непосредственно воспроизводить глубокую конвекцию без использования каких-либо процедур ее параметризации. Пока численный прогноз нельзя назвать идеальным ввиду ошибок, возникающих из-за зависимости результатов моделирования от недостаточно высокого пространственного и временного разрешений моделей [1, 2] и недостаточного количества наблюдений.

Весьма полезными в этом случае оказываются большие массивы данных, полученные с геостационарных спутников. Однако методы их обработки по-прежнему далеки от идеала и поэтому привлекают внимание исследователей всего мира. Кроме того, рост интереса связан с повышением доступности вычислительных мощностей и развитием методов компьютерного зрения.

Цель данной статьи – представить новый алгоритм распознавания опасной кучево-дождевой облачности и слежения за нею (мониторинга, трекинга) на основе данных метеорологических искусственных спутников Земли (МИСЗ).

Достижение данной цели потребует выполнения нескольких задач. Во-первых, необходимо определить объект исследования и перечислить возникающие опасные конвективные явления, связанные с облачностью глубокой конвекции (ОГК), что требуется для формирования предупреждений при своевременном обнаружении и мониторинге облачности. Во-вторых, следует привести базовые принципы, использованные в задаче распознавания глубокой конвекции по данным МИСЗ. В-третьих,

безусловно, требуется представить описание разработанного алгоритма и выделить отличие от аналогов, предложенных другими исследователями. Наконец, качество работы алгоритма важно проверить, что и будет сделано на основе цифровых спутниковых данных наблюдений за период с 11 по 12 июня 2019 года, когда было зафиксировано большое число опасных явлений, связанных с ОГК в Европе.

Алгоритмы распознавания ОГК по данным МИСЗ

В последние годы было предложено множество инструментов для анализа глубокой конвекции по данным МИСЗ. Каждый из них можно разделить на три последовательных процедуры: чтение исходных данных, распознавание ОГК, трекинг ОГК, сохранение результатов (рис. 1).



Рис. 1. Краткая схема автоматизированного анализа глубокой конвекции по данным МИСЗ.

Fig. 1. Process flow diagram for the automated analysis of deep convection by using satellite data.

Реализация каждой процедуры зависит как от постановки задачи, так и от методов, используемых для решения. В частности, некоторые исследователи концентрируются на слежении (трекинге, мониторинге) уже образовавшихся конвективных штормов, например метод «RDT» [16], метод «MASCOTTE» [18]; либо при их выделении на этапе зарождения (инициации), например метод «SATCAST» [14]. Существуют и более универсальные методы и алгоритмы с учетом распознавания и мониторинга глубокой конвекции как на этапе возникновения, так и на более поздних стадиях развития конвективных образований. В качестве примера одного из наиболее успешных алгоритмов можно назвать метод «Cb-TRAM» [15, 23]. Авторы [18] представили исследование качества работы алгоритмов «SATCAST» и «Cb-TRAM» и установили довольно высокую долю ложных срабатываний, связанную с особенностями процесса возникновения конвекции.

В то же время несовершенство перечисленных алгоритмов мотивирует новые исследования, ведущие к их постепенному улучшению. В данной статье, воспользовавшись уже проверенным пороговым методом распознавания облачности глубокой конвекции, сосредоточимся на улучшении алгоритма слежения (мониторинга) или трекинга ОГК. Предлагаем способ реализации алгоритма, который позволяет эту задачу свести к задаче целочисленного линейного программирования.

Исходные данные

Основой для построения алгоритма послужили архивные материалы в виде ежедневных файлов, сформированных с дискретностью каждые 15 минут за несколько лет. Многоканальные спутниковые ежедневные измерения представлялись в виде бинарных записей. Каждая запись включала архив измерений в восьми каналах электромагнитного спектра, каждый канал составлял матрицу из 2312×1000 элементов (пикселей) ~ для $\frac{1}{4}$ части полного диска сканирования Земли с помощью прибора SEVIRI МИСЗ METEOSAT-11 [19].

Остановимся кратко на особенностях выбранных каналов. Значения измерений инфракрасного канала в полосе прозрачности атмосферы (IR 10,8 мкм) позволяют оценить температуру поверхности Земли или верхней границы облачного покрова. Радиационная (измеряемая с помощью приборов МИСЗ) температура соответствует при минимальных отрицательных значениях большим высотам облачности над поверхностью Земли при доступности в любое время суток или зимним температурам заснеженных или оледеневших поверхностей Земли. Определение типа излучающей поверхности, верхней границы мощной облачности или подстилающей заснеженной поверхности не входило в наши задачи. Анализировались данные ИК-диапазона в умеренных широтах летом, при процессах, характерных для образования глубокой конвекции.

Излучение водяного пара (WV) в двух диапазонах (6,3 и 7,3 мкм) использовано для оценки наличия облаков в верхней и средней трети слоя тропосферы от ~2 км до 10–17 км. Поглощенное водяным паром излучение в нижних слоях оказывается незамеченным геостационарным спутником. Облачный покров, насыщенный водяным паром и достигающий больших высот в верхних слоях тропосферы (перистые и кучево-дождевые облака), напротив, удобнее анализировать с помощью измерений, сделанных в этом диапазоне.

Анализ данных видимого канала (радиация с длиной волны в диапазоне 0,6 мкм) дает возможность оценить более детальную, характерную для разных типов текстуру облачности [10, 16]. Однако отсутствие возможности измерений видимого канала в круглосуточном режиме не позволяет использовать преимущества таких измерений при мониторинге облачности.

Дополнительно использованы данные о разностях значений радиационной температуры в каналах электромагнитного излучения (WV 6,2 – IR 10,8) мкм и (WV 6,2 – WV 7,3) мкм, что позволило более точно выявить высокие, насыщенные влагой облака определенной текстуры, в том числе и относящиеся к глубокой конвекции. Выбор сделан на основе опубликованных в [12, 13] материалов.

Далее подробно опишем принцип работы алгоритма, в частности двух этапов: выделения и трекинга объектов.

Распознавание объектов с помощью метода «машинного зрения»

На первом этапе необходимо было получить маску объекта опасной кучевой облачности. Для получения начальной маски всех областей, относящихся к опасной кучевой облачности (ОГК), алгоритмом проводится сравнение измерений температуры каналов с длинами волн в диапазонах, описанных ранее, с заранее установленными пороговыми значениями в соответствии с литературными источниками.

Представим эту маску в виде матрицы C . Ее элементы можно вычислить с помощью функции f от трех переменных – измерений в трех диапазонах:

$$C_{ij} = f(T_{ij}^{10,8}, T_{ij}^{6,2}, T_{ij}^{7,3}); \quad (1)$$
$$j = 1, \dots, 2312; i = 1, \dots, 1000.$$

Функция f возвращает единицу при выполнении некоторого условия, нуль – в противном случае. Элемент матрицы с индексами (i, j) , (пиксель) можно считать частью конвективной ячейки ($C_{ij} = 1$), если выполняется ряд условий, каждое из которых опирается либо на попадание в заданные пределы температуры в определенном диапазоне длины волны, либо на заданные пределы значений разностей измерений температуры в двух диапазонах.

В литературе нет единого мнения относительно того, какие пороговые значения лучше всего использовать. В [20] проанализированы предельные значения для канала IR 10,8, использованные многими исследователями, и при построении собственного алгоритма выбрано значение 233 К. Мы остановимся на этом же значении.

Пороговые значения для разностей (WV 6,2 – IR 10,8) мкм и (WV 6,2 – WV 7,3) мкм были заимствованы из работ [12, 13]. Они провели статистических анализ измерений температуры во всех диапазонах, доступных для измерений с помощью прибора SEVIRI (МИСЗ MSG METEOSAT), для двух выборок: в случаях, когда имелись облака, вблизи которых за некоторый промежуток времени была зафиксирована гроза, и в случаях, когда имелись облака, которые не привели к возникновению опасных явлений. На основе полученных распределений температуры в [2] нами выбраны те же оптимальные пороговые значения. В таблице показаны результаты выбора порогов.

В итоге мы получили разбиение массива данных (исходного изображения) условно на два класса: «конвекция» (наличие ОГК) и «не конвекция» (отсутствие ОГК). Для анализа важно в первую очередь иметь маску каждого объекта, относящегося к классу «конвекция». Геометрическая форма этих объектов, как правило, такова, что индивидуальные пиксели группируются в кластеры выпуклой формы с четко выраженными центрами (для облаков более кратко назовем термином «верхушка»).

Таблица. Условия отнесения пикселя к классу глубокой конвекции (объекту)
Table. Threshold temperature values for assigning a pixel to the deep convection object

Величина	Значения температуры (К)	Описание
$T_{ij}^{10,8}$	< 233	Пороговое значение температуры верхней границы облака
$T_{ij}^{6,2} - T_{ij}^{10,8}$	> -10	Пороговое значение разности для верхней границы облака большой мощности.
$T_{ij}^{6,2} - T_{ij}^{10,8}$	> -4	Пороговое значение разности оценки вертикальной мощности в верхнем слое ВГО

Учет формы ОГК – используется алгоритм оценки эллипсообразной округлости формы объекта (наковальни). Подбор делается с помощью метода наименьших квадратов [8]. В результате процедуры получаем координаты центра эллипса, длины меньшей и большей его осей и углы их наклона. На основе этих данных получим матрицу E , каждый элемент которой, по аналогии с матрицей R , определяет принадлежность пикселя к эллипсам.

Далее рассчитаем два важных показателя:

1. Отношение меньшей оси к большей:

$K_1 = a/b$, где a – длина меньшей оси; b – длина большей оси.

2. Площадь пересечения объекта и его эллипса:

$$K_2 = |I|/|U|,$$

где $|I| = \{(i, j) : R_{ij} = n\} \cap \{(i, j) : E_{ij} = n\}$;

$$|U| = \{(i, j) : R_{ij} = n\} \cup \{(i, j) : E_{ij} = n\}.$$

Предполагаем, что мезомасштабные конвективные системы (МКС) не могут иметь слишком вытянутую форму, поэтому накладываем ограничение на приемлемые значения показателя K_1 . Далее исключаем случаи невыпуклой и угловатой формы по сравнению с идеальной. Учет таких случаев делается сравнением площади объекта и описывающего его эллипса с помощью показателя K_2 .

Проверку формы каждого объекта в алгоритме предлагается делать путем выделения области ОГК (ВГО ОГК) методом разрастания площади областей с учетом минимальных отклонений температуры ВГО ОГК для оценки соответствия следующему критерию:

$$\begin{cases} K_1 > 0,2 \\ K_2 > 0,7 \end{cases} \quad (2)$$

Только объекты, успешно прошедшие этот тест, признаются объектами ОГК. На следующем этапе распознавания и принадлежности

к одному и тому же объекту мы предлагаем применить простейший морфологический фильтр со структурным элементом

$$s = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

для разметки связных областей [8, 24] к маске, т. е. мы будем считать, что пиксель принадлежит объекту (ОГК), если

$$C_{ij} = C_{i+1,j} = C_{i,j+1} = C_{i-1,j} = C_{i,j-1}. \quad (4)$$

Таким образом мы получаем множество конвективных ячеек (когда ОГК в виде одного ядра – назовем ядро КЯ) или систем (когда ОГК в виде скопления – МКС или МКК). Для простоты мы будем называть их объектами. Очевидно, что каждый объект имеет свою маску, а значит, число объектов соответствует числу масок, которые мы получили на основе первоначальной маски C .

Так как маски характеризуют объекты в определенный момент времени, будем во всех дальнейших обозначениях применять верхний индекс t для привязки переменных к этому моменту времени.

Пусть Z_n^t – n -я маска в момент времени t . Размерность Z_n^t соответствует размерности исходной матрицы температуры, а ее элементы принимают значения из множества $\{0,1\}$.

Важно добавить, что маски объектов в один момент времени t не пересекаются, т. е. не имеют общих пикселей. Отсюда

$$\prod_{n=1}^{N^t} Z_n^t = 0, \quad (5)$$

где N^t – число объектов в момент времени t .

Трекинг выделенных объектов

Для установления связи между объектами, идентифицированными на шаге $(t-1)$ и шаге t необходимо сначала установить соответствие между объектами и масками. Мы предполагаем, что процедуру установления соответствия между известными объектами и новыми масками можно проводить последовательно, шаг за шагом.

Введем в рассмотрение случайную величину r_m^t ,

$$\text{где } r_m^t = \begin{cases} n, & \text{если } n\text{-я маска назначается } m\text{-му объекту;} \\ 0, & \text{если объект исчез} \end{cases} \quad (6)$$

$$m = 1, \dots, N^{t-1}, \quad n = 1, \dots, N^t, \quad t = 2, 3, \dots$$

Примечательно, что множество объектов непостоянно: на каждом шаге некоторые из старых объектов могут исчезнуть, а также могут

появиться новые. Это существенно усложняет задачу. С другой стороны, мы исключаем возможность «возвращения» объекта – ситуации, когда, исчезнув на каком-то предыдущем шаге, он появляется вновь. Отсюда следует, что если объект был выделен на шаге $(t-1)$, на шаге t он отсутствовал и на шаге $(t+1)$ появился вновь, то наш алгоритм зафиксирует его распад на шаге t , а затем рождение нового объекта.

Для наглядности приведем пример процесса установления соответствия между индексами распознанных ранее объектов с индексами новых масок: на первом шаге мы выделяем три маски и назначаем им объекты с индексами 1, 2, 3. На следующем шаге $(t=2)$ мы выделяем пять масок с индексами 1, 2, 3, 4, 5 и устанавливаем взаимно однозначное соответствие между множествами $\{1, 2, 3\}$ и $\{1, 2, 3, 4, 5\}$. Третий шаг аналогичен второму.

Далее, так как в каждый момент времени мы знаем, к какому объекту какие пиксели относятся, можно проследить, куда смещается объект, его деформацию и рассчитать различные показатели, полезные для анализа.

Заметим, что поставленная задача решалась многими исследователями в рамках других алгоритмов трекинга конвективных штормов. Например, в пределах алгоритма «Cb-TRAM» и его многочисленных модификаций (например, «MASCOTTE») авторы опирались на сравнение фактических и прогнозируемых масок в момент времени [5]. Прогноз смещения и деформации объекта формировался на основе модели оптического потока, которая строилась на истории изменения матрицы наблюдений [23].

В качестве критерия схожести эти алгоритмы используют нормированную площадь пересечения двух объектов (их масок). То есть при сравнении n -й маски Z_n^t , сформированной в момент времени t , и прогнозируемого состояния k -й маски в момент времени $t \cdot \hat{Z}_k^t$, но выделенной в момент времени $(t-1)$, рассчитывается показатель S_{kn}^t по формуле

$$S_{kn}^t = \frac{\sum_{i,j} Z_{nij}^t \hat{Z}_{kij}^t}{\sum_{i,j} \hat{Z}_{kij}^t}. \quad (7)$$

Далее назначение определяется по формуле:

$$\hat{r}_k^t = \arg \max_n S_{kn}^t. \quad (8)$$

Критерий схожести, используемый в нашем алгоритме, отличается тем, что прогнозируемые значения $\hat{Z}_k^t$ заменяются фактическими значениями k -й маски Z_k^{t-1} в момент времени $(t-1)$. Предполагаем, что смещение и деформация объекта за один временной шаг (15 минут) незначительны, а значит вычислительно сложной процедурой расчета оптического потока на данном этапе можно пренебречь.

Далее заметим, что формула определения назначения $\hat{r}_k^t$, используемая в методе «Cb-TRAM», может привести к некорректному назначению.

Чтобы исключить ситуацию некорректного решения при использовании формулы назначения метода «Cb-TRAM», мы предлагаем формулировать задачу установления соответствия между объектами в разные моменты времени (рис. 2) как оптимизационную с единой функцией ошибки. Похожий подход предлагался, например, в [9].

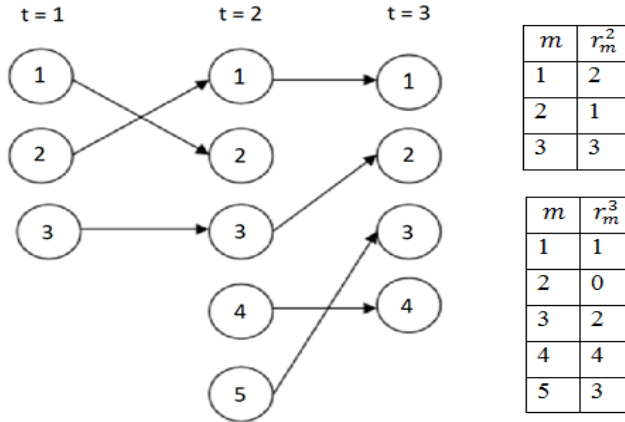


Рис. 2. Схема процесса установления соответствия между индексами распознанных ранее объектов с индексами новых масок.

Fig. 2. The Schematic illustration of the process of assigning mask indices to object indices.

Данная задача хорошо известна в области компьютерного зрения и называется задачей ассоциации. Если бы не возможность исчезновения старых объектов и возникновения новых, ее можно было бы переформулировать в задачу о назначениях во взвешенном двудольном графе, эффективные алгоритмы решения которых известны и активно применяются в контексте трекинга нескольких объектов [4, 22].

Таким образом, исходную задачу можно свести к задаче оптимизации с ограничениями. Предполагая, что оптимальное назначение на шаге t (в момент времени t) зависит лишь от предыдущего назначения, предыдущей маски и всех новых масок (выделенных в момент времени t), мы будем рассматривать этот процесс как марковский. Для краткости формул введем следующие обозначения:

$\mathbf{Z}^t = \{Z_l^t, l = 1, \dots, N^t\}$ – множество масок, выделенных в момент времени t ;

$\mathbf{Z}_{-n}^t = \{Z_l^t, l = 1, \dots, n-1, n+1, \dots, N^t\}$ – множество масок, выделенных в момент времени t , за исключением n -й.

Запишем формулу вероятности назначения n -й маски, выделенной на шаге t , m -му объекту, выделенному на шаге $(t-1)$.

По формуле Байеса для $n = 1, \dots, N^t$ имеем

$$\begin{aligned} P(r_m^t = n \mid Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}^t) &= \\ &= \frac{P(Z_n^t \mid r_m^t = n, Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t) P(r_m^t = n \mid Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t)}{\sum_{n=1}^{N^t} P(Z_n^t \mid r_m^t = n, Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t) P(r_m^t = n \mid Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Условную вероятность исчезновения объекта ($n=0$) тогда можно задать формулой

$$P(r_m^t = 0 \mid Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}^t) = 1 - \sum_{n=1}^{N^t} P(r_m^t = n \mid Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}^t). \quad (10)$$

Допустим, что априорные вероятности назначения на шаге t равны между собой (на шаге $(t-1)$ мы можем лишь догадываться о назначении на следующем шаге – "подбрасывать монету"), то есть

$$P(r_m^t = n \mid Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t) = \frac{1}{N^t + 1}. \quad (11)$$

$$\forall n = 0, \dots, N^t$$

В таком случае выражение (9) можно значительно упростить за счет сокращения величин $P(r_m^t = n \mid Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t)$:

$$P(r_m^t = n \mid Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t) = \frac{P(Z_n^t \mid r_m^t = n, Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t)}{\sum_{n=1}^{N^t} P(Z_n^t \mid r_m^t = n, Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t)}. \quad (12)$$

Таким образом, определив функцию распределения $P(Z_n^t \mid r_m^t = n, Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t)$, мы сможем давать оценку тому или иному назначению и использовать заданную функцию при принятии решений. Мы остановили свой выбор на формуле нормированной площади пересечения масок:

$$P(Z_n^t \mid r_m^t = n, Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}_{-n}^t) = \frac{\sum_{i,j} z_{nij}^t z_{mij}^{t-1}}{\sum_{i,j} z_{mij}^{t-1}}, \quad (13)$$

где z_{nij}^t – элемент матрицы Z_n^t на пересечении i -й строки и j -го столбца.

Важно отметить, что $\sum_{i,j} z_{mij}^{t-1} \geq 1$, а значит, деление на ноль исключается. Кроме того, из неравенства $0 \leq z_{nij}^t \leq 1$ следует:

$$0 \leq \sum_{i,j} z_{nij}^t z_{mij}^{t-1} \leq \sum_{i,j} z_{mij}^{t-1}. \quad (14)$$

Тогда, очевидно,

$$0 \leq \frac{\sum_{i,j} z_{nij}^t z_{mij}^{t-1}}{\sum_{i,j} z_{mij}^{t-1}} \leq 1, \quad (15)$$

что соответствует определению функции распределения.

Составив из величин $P(r_m^t = n | Z_m^{t-1}, \mathbf{Z}^t)$ матрицу W размерности $N^{t-1} \times (N^t + 1)$, мы сможем найти оптимальные значения с помощью метода Global Nearest Neighbor Standard Filter (GNNSF), часто используемого для решения задачи ассоциации. Маски, оставшиеся без назначения (без соответствующего объекта), присваиваются новым объектам (наблюдается рождение нового объекта ОГК).

Метод GNNSF подразумевает поиск решения линейной задачи о назначениях с максимальной суммой (Linear Sum Assignment Problem) [3]. В конечном итоге эта задача сводится к задаче целочисленного линейного программирования с переменными, принимающими всего два значения: нуль и единица. Для этого случая есть алгоритмы полиномиальной сложности [17], что намного лучше экспоненциальной сложности, характерной для метода простого перебора.

Оценка качества работы алгоритма

Так как реализованный алгоритм состоит из двух этапов (распознавание объектов, трекинг) и ошибки возможны на каждом из них, полноценный анализ качества его работы также должен состоять из двух частей. Однако валидация каждого этапа в отдельности оказывается невозможной ввиду их тесной взаимосвязи, поэтому, как правило, более предпочтительной является оценка способности алгоритма выполнять поставленную задачу, например прогнозировать возникновение глубокой конвекции [6, 16].

На практике чаще всего используются три метода валидации:

1. Статистический анализ соответствия распознанных объектов наблюдаемым опасным явлениям (по географическим координатам и по времени).
2. Статистический анализ соответствия параметров полученных объектов параметрам, характерным для облачности глубокой конвекции (например, размеру, продолжительности жизни и траектории).
3. Детальное исследование отдельных случаев (case study) возникновения глубокой конвекции.

Для реализации первого метода валидации необходимо иметь доступ к обширной базе синоптических данных и данных сети грозоотметчиков.

Однако полученные оценки будут неточными: во-первых, наблюдения за грозами и измерения геостационарного спутника (распознанные объекты) будут чаще всего не согласованы по времени и географическим координатам; во-вторых, они не учитывают качества построенной траектории смещения объекта – неестественные «прыжки», слияния и распады не будут замечены [11]. Иными словами, данный метод не позволяет в полной мере проверить алгоритм трекинга.

Второй метод валидации, напротив, дает возможность оценить способность алгоритма следить за перемещениями объектов и их деформацией. С помощью анализа распределений продолжительности жизни и размера объектов можно сделать вывод о том, насколько они соответствуют процессу возникновения и развития облачности глубокой конвекции. Недостаток этого метода состоит в том, что на его основе нельзя судить о качестве распознавания самих объектов: т. е. можно ошибочно распознать скопления перистых облаков как кучево-дождевые, и тогда данный метод завысит оценку качества работы алгоритма.

Третий метод валидации опирается на экспертизу исследователя и небольшой объем значительно детализированных наблюдений за явлениями погоды в выбранные дни в выбранных регионах. Его преимущество – в более аккуратной оценке качества работы алгоритма. Более того, есть возможность проследить за каждой итерацией, сравнивая результаты с реальной синоптической ситуацией. Его недостаток в том, что сложно обеспечить репрезентативность выборки [10]. Этот метод использовался, например, для валидации алгоритма «TOOCAN» [6].

Учитывая перечисленные выше преимущества и недостатки, мы остановили свой выбор на третьем методе валидации. В качестве исходных данных для запуска алгоритма были выбраны 192 изображения (поля наблюдений МИСЗ) 11 и 12 июня 2019 года (с интервалом каждые 15 мин в течение 48 ч). Для проверки результатов его работы были использованы данные наблюдений наземной сети синоптических станций за рассматриваемый период, полученные по каналам связи Росгидромета, и комплексные данные сообщений из European Severe Storms Laboratory.

Алгоритму удалось выявить 856 объектов. Более 560 конвективных ячеек (КЯ) характеризовались малым сроком жизни, не превышающим 1 час: некоторые находились на этапе распада в начале рассматриваемого периода. Около 100 ячеек имели время жизни 1,5 ч. Всего 3–6 КЯ имели долгую продолжительность жизни – около 10 ч и лишь 1 или 2 КЯ наблюдались в течение 14–16 ч. Это согласуется с физическими законами развития конвекции разной интенсивности и мощности облачных образований. Возможно, некоторые не могли развиваться в мощные конвективные ячейки (ОГК) (рис. 3), а некоторые, скорее всего, были выявлены ошибочно.

Последнее замечание соответствует установленному свойству пороговых алгоритмов демонстрировать высокую долю «ложных

срабатываний» [14]. С одной стороны, это характеризует алгоритм как не идеальный. С другой стороны, данный недостаток нельзя считать критически значимым, так как основная задача алгоритма состоит в выявлении действительно опасных кучево-дождевых облаков (без пропусков) – важнее их не «упустить».

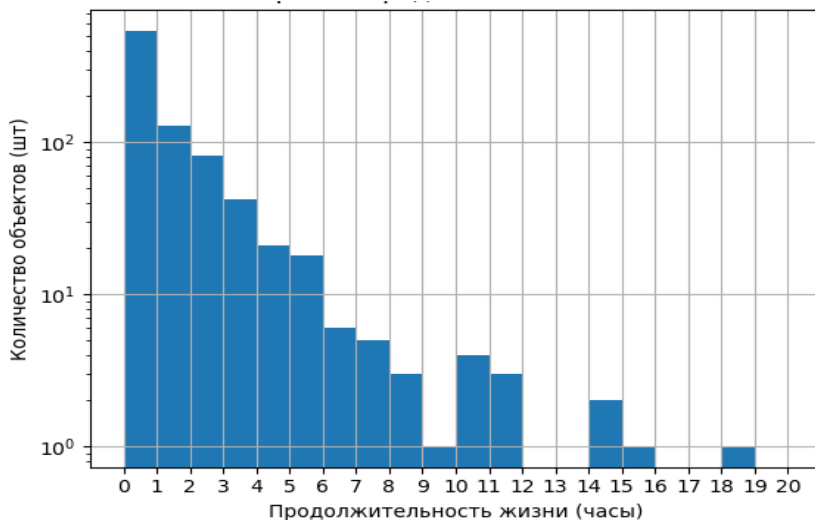


Рис. 3. Гистограмма распределения числа объектов (ОГК) в зависимости от продолжительности жизни выявленных объектов (лог. масштаб).

Fig. 3. The object lifetime histogram with log-scale for the y-axis.

Тем не менее хорошо видно, что алгоритму удалось также выделить объекты, продолжительность жизни которых была менее или около одного часа. Это значит, что процедура распознавания объектов и их перемещения работает и способна работать длительно.

Особого внимания заслуживает объект, продолжительность жизни которого превысила 18 ч. На самом деле он относится к МКС, которая существовала гораздо дольше. Алгоритму удалось проследить ее развитие как одного объекта с 00 ч ВСВ по 14.30 ч ВСВ 11 июня (в течение 14 ч 30 мин) (рис. 4). Затем система перестала выделяться алгоритмом. Рядом с ней был распознан новый объект, трекинг которого осуществлялся с 14.45 ч ВСВ 11 июня по 09.00 ч ВСВ 12 июня (18 ч 15 мин).

Около 8.00 ч ВСВ началось уменьшение площади объекта (рис. 5) и рост минимальной температуры верхней границы облака (ВГО) (рис. 6), а значит, и уменьшение высоты ВГО.

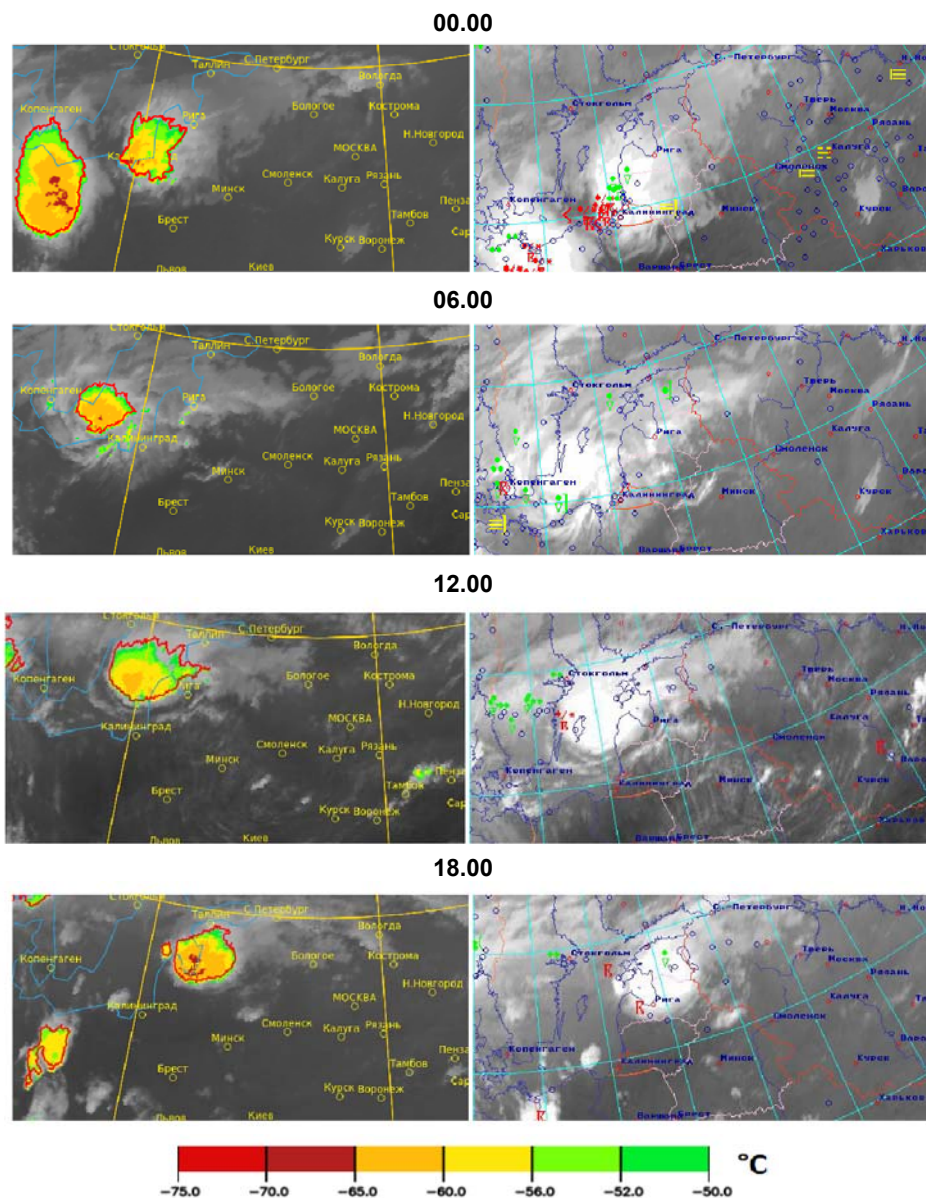


Рис. 4. Смещение МКС над восточной Европой 11 июня 2019 г. с 00 ч по 18.00 ч ВСВ. Визуализация результатов работы алгоритма — слева, объекты выделены красными контурами. Справа представлены данные синоптической сети наблюдений за опасными явлениями на фоне данных МИСЗ IR 10,8 мкм.

Fig. 4. The MCS movement over Eastern Europe on June 11, 2019, 12.00 - 06.00 UTC. The left subfigure illustrates detection and tracking results with the contours of detected objects colored red. The right subfigure illustrates severe weather observations reported by the synoptic network. IR 10.8 image is used as the background.

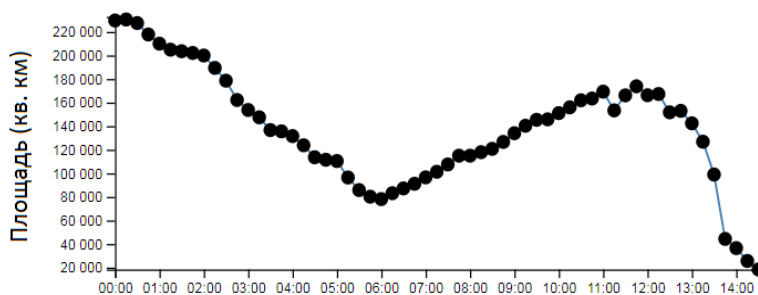


Рис. 5. Динамика площади МКС в период 00–14.30 ч ВСВ 11 июня 2019 г.
Fig. 5. Change in MCS area on June 11, 2019, 12 a.m. - 2.30 p.m.

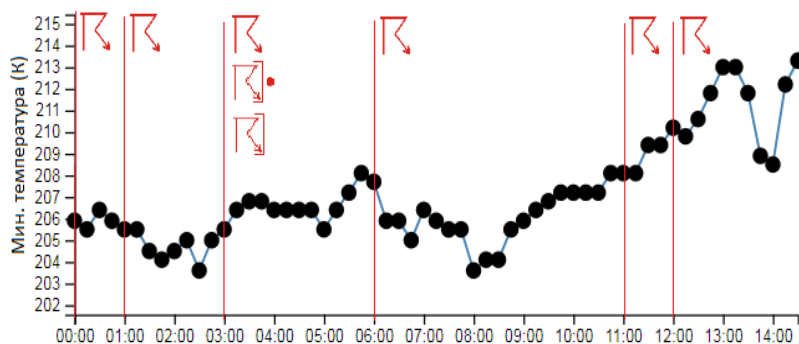


Рис. 6. Динамика распределения минимальной температуры облака ($T_{10.8 \text{ мкм}}$, K) верхней границы облаков в пределах МКС в период 00.00 – 14.30 ч ВСВ 11 июня 2019 г. Красными вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в районе объекта наблюдались грозы.
Fig. 6. MCS minimum cloud shield temperature dynamics ($IR_{10.8}$, K) on June 11, 2019, 12 a.m. – 2.30 p.m. UTC. Lightning occurrences within the object's area are indicated by red vertical lines.

Важно отметить, что за период с 12.00 по 15.00 ч ВСВ на территории, над которой находился рассматриваемый объект, не было зафиксировано ни одного случая грозы – это также свидетельствует об ослабевании МКС. Приблизительно для момента 14.15 ч ВСВ алгоритм выявил снижение интенсивности МКС, что привело к разделению на четыре более мелких и менее высоких ядра КЯ (рис. 7).

Отсутствие гроз и ливней на карте также подтверждает вывод алгоритма, что МКС не исчезла, но значительно понизилась степень ее опасности. Ядра КЯ в принципе могут регенерировать и усилиться позже и на некотором расстоянии при дополнительных условиях вынуждения.

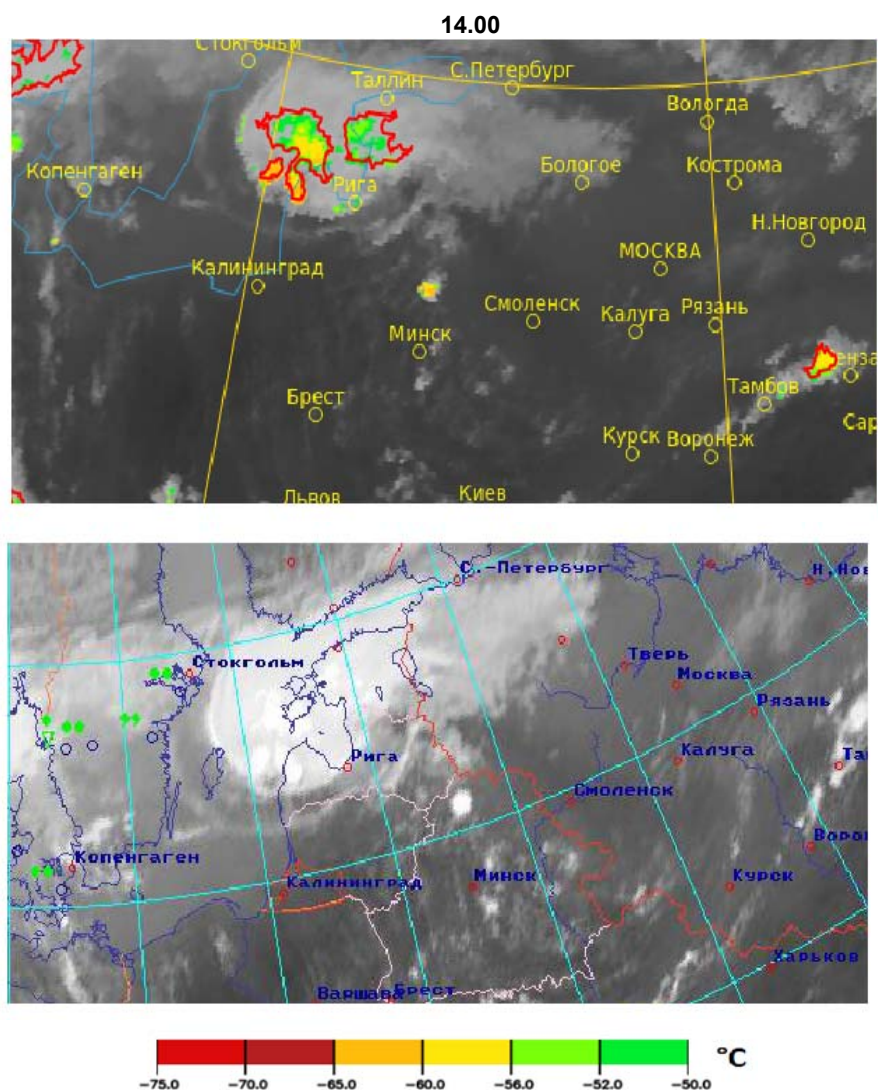


Рис. 7. МКС над восточной Европой в 14.00 ч ВСВ 11 июня 2019 г. Визуализация результатов работы алгоритма – слева, объекты ОГК выделены красными контурами. Справа представлена карта синоптических наблюдений на фоне спутниковых данных (T10,8 мкм).

Fig. 7. MCS over Eastern Europe on June 11, 2019, at 14.00 UTC. The left subfigure illustrates detection and tracking results with the contours of detected objects colored red. The right subfigure illustrates severe weather observations reported by the synoptic network. IR 10.8 image is used for the background.

Действительно, уже в 14.30 ч ВСВ алгоритм зафиксировал образование нового объекта в этой же области (рис. 8). Учитывая его географическое положение и отсутствие других объектов рядом, мы сделали вывод о том, что он является результатом регенерации ослабевшей, рассматриваемой ранее МКС.

Объект МКС перестал активно развиваться в ночь с 11 на 12 июня 2019 г.: наблюдался рост его площади (рис. 8), сопровождающийся небольшим понижением температуры верхней границы облачности в пределах контура (рис. 9), вплоть до полуночи, после чего площадь начала уменьшаться, а температура – расти. В 12.00 система окончательно распалась (алгоритм перестал ее выделять около 9.00 ч ВСВ).

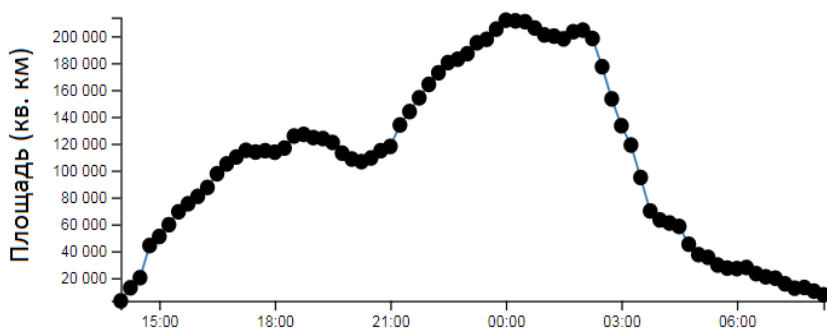


Рис. 8. Динамика площади МКС в период с 14.45 ВСВ 11 июня по 09.00 ВСВ 12 июня 2019 г.

Fig. 8. MCS area dynamics from June 11, 2019, 14.45 to June 12, 2019, 09.00.

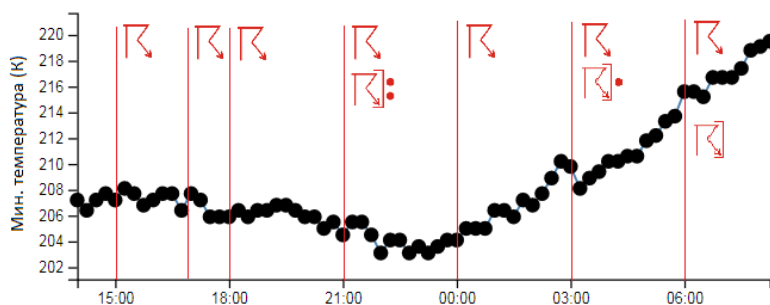


Рис. 9. Динамика минимальной температуры ВГО ($T_{10.8 \text{ мкм}}$), регенерировавшей МКС с 14.45 ВСВ 11 июня по 09.00 ВСВ 12 июня 2019 г. Красными вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в районе объекта наблюдались грозы.

Fig. 9. MCS minimum cloud shield temperature dynamics (IR 10.8, T K) from June 11, 2019, 14.45 to June 12, 2019, 09.00. Lightning occurrences in the object's area are indicated by red vertical lines.

Таким образом, существенных отклонений от наблюдений в результатах работы алгоритма выявлено не было. Кроме того, контуры, выделяемые алгоритмом, соответствуют местам, где были действительно зафиксированы опасные явления, связанные с глубокой конвекцией. Следовательно, можно сделать вывод о корректности алгоритма и его практической ценности.

Выводы

В данной статье была описана реализация нового алгоритма распознавания опасной кучево-дождевой облачности и слежения за нею на основе данных метеорологических искусственных спутников Земли.

Первый этап работы алгоритма, связанный с выделением объектов (их маски), основан на рекомендациях из литературы и не имеет новизны.

Второй же этап – трекинг выделенных объектов – сводится к решению задачи ассоциации, которую, в свою очередь, мы свели к задаче целочисленного программирования с выбранными ограничениями. Была сформулирована функция ошибки и предложен алгоритм оптимизации. Кроме того, проведено сравнение предложенного подхода с аналогами других исследователей.

Корректность работы алгоритма была проверена на основе информации, наблюдаемой МИСЗ Метеосат-11 за период с 11 по 12 июня 2019 г. (48 часов). В этот день над Европой наблюдались несколько МКС, самая мощная из которых спровоцировала комплекс опасных явлений. Сведения о распознавании и динамике температуры верхней границы ОГК этой системы, сформированные в результате работы алгоритма, соответствуют выводам визуального анализа и данным European Severe Storms Laboratory. Поэтому можно сделать заключение, что качество работы предлагаемого алгоритма оптимизации для решения задачи распознавания и трекинга (мониторинга) ОГК удовлетворительно и его можно использовать в практической деятельности.

Список литературы

1. Васильев А.А., Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Совместное использование численных мезомасштабных и концептуальных моделей при оперативном прогнозе опасных явлений погоды // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 48-57.
2. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. 308 с.
3. Blackman S.S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston; London: Artech House, 1999. 1230 p.
4. Breitenstein M.D., Reichlin F., Leibe B., Koller-Meier E., Van Gool L. Robust tracking-by-detection using a detector confidence particle filter // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2009. P. 1515-1522.
5. Carvalho L.M., Jones C. A Satellite Method to Identify Structural Properties of Mesoscale Convective Systems Based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE) // J. Appl. Meteorol. 2001. Vol. 40. P. 1683-1701.

6. *Carvalho L.M., Jones C.* A Satellite Method to Identify Structural Properties of Mesoscale Convective Systems Based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE) // *J. Appl. Meteorol.* 2001. Vol. 40. P. 1683-1701.
7. *Fiolleau T., Roca R.* An Algorithm for the Detection and Tracking of Tropical Mesoscale Convective Systems Using Infrared Images From Geostationary Satellite // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions.* 2013. Vol. 51. P. 4302-4315.
8. *Fiorio C., Gustedt J.* Two linear time Union-Find strategies for image processing // *Theoret. Comp. Sci.* 1996. Vol. 154. P. 165-181.
9. *Fitzgibbon A.* A Buyer's Guide to Conic Fitting. // *Proc. 5th British Machine Vision Conference*, 1995. P. 51.1-51.10.
10. *Han L., Fu S., Zhao L., Zheng Y., Wang H., Lin Y.* 3D Convective storm identification, tracking and forecasting – an enhanced TITAN algorithm // *J. Atm. Ocean. Tech.* 2009. Vol. 26. P. 719-732.
11. *Johnson J.T., Mackeen P.L., Witt A., Mitchell E.D., Stumpf G.J., Eilts D., Thomas K.W.* The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm // *Wea. Forecast.* June 1998. Vol. 13, no. 2. P. 263-276.
12. *Kuo K.S., Welch R.M., Weger R.C.* The three-dimensional structure of cumulus clouds over the ocean. 1. Structural analysis. // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. P. 20685-20711.
13. *Lakshmanan V., Smith T.* An objective method of evaluating and devising storm-tracking algorithms // *Wea. Forecast.* April 2010. Vol. 25, no. 2. P. 701-709.
14. *Matthee R., Mecikalski J.R.* Geostationary infrared methods for detecting lightning-producing cumulonimbus clouds // *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 6580-6592.
15. *Mecikalski J.R., MacKenzie W.M., Koenig M., Muller S.* Cloud-Top Properties of Growing Cumulus prior to Convective Initiation as Measured by Meteosat Second Generation. Part I: Infrared Fields // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2010. Vol. 49. P. 521-534.
16. *Mecikalski J.R., Bedka K.M.* Forecasting Convective Initiation by Monitoring the Evolution of Moving Cumulus in Daytime GOES Imagery // *Mon. Wea. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 49-78.
17. *Merk D., Zinner T.* Detection of convective initiation using Meteosat SEVIRI: implementation in and verification with the tracking and nowcasting algorithm Cb-TRAM // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. Vol. 6, no. 8. P. 1903-1918.
18. *Morel C., Senesi S.* A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. II: Characteristics of European mesoscale convective systems // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2002. Vol. 128. P. 1973-1995.
19. *Nair U.S., Rushing J.A., Ramachadran R.K., Kuo S., Welch R.M., Graves S.J.* Detection of cumulus cloud fields in satellite imagery // *Proc. of SPIE Conference on Earth Observing Systems IV.* Denver, CO, SPIE, 2019. P. 345-355.
20. *Papadimitriou C.H.* On the complexity of integer programming // *J. ACM.* October 1981. Vol. 28, no. 4. P. 765-768.
21. *Reinhardt B., Dotzek N.* Validation of the MSG Convection Initiation Product (Final Report) // *EUMETSAT Technical Reports.* 2010.
22. *Schmetz J., Pili P.* An Introduction to METEOSAT Second Generation (MSG) // *BAMS.* 2002. P. 977-992.
23. *Silva Neto C.P., Alves Barbosa H., Assis Beneti C.A.* A method for convective storm detection using satellite data // *Atmósfera.* 2016. Vol. 29, is. 4. P. 343-358.
24. *Wu K., Otoo E., Shoshani A.* Optimizing connected component labeling algorithms // *Paper LBNL-56864 Lawrence Berkeley National Laboratory (University of California),* 2005.
25. *Xing J., Ai H., Lao. S.* Multi-object tracking through occlusions by local tracklets filtering and global tracklets association with detection responses // *Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,* 2009. P. 1200-1207.
26. *Zinner T., Mannstein H., Tafferner A.* Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2008. Vol. 101. P. 191-210.

References

1. Vasiliev A.A., Vil'fand R.M., Golubev A.D. The joint use of mesoscale numerical and conceptual models in operational forecast of hazard weather phenomena. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 359, pp. 48-57 [in Russ.].
2. Kalinin N.A. Monitoring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shirotah. Perm: Perm State University, 2015, 308 p. [in Russ.].
3. Blackman S.S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston; London: Artech House, 1999, 1230 p.
4. Breitenstein M.D., Reichlin F., Leibe B., Koller-Meier E., Van Gool L. Robust tracking-by-detection using a detector confidence particle filter. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2009, pp. 1515-1522.
5. Carvalho L.M., Jones C. A Satellite Method to Identify Structural Properties of Mesoscale Convective Systems Based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE). *J. Appl. Meteorol.*, 2001, vol. 40, pp. 1683-1701.
6. Carvalho L.M., Jones C.A. Satellite Method to Identify Structural Properties of Mesoscale Convective Systems Based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE). *J. Appl. Meteorol.*, 2001, vol. 40, pp. 1683-1701.
7. Fiolleau T., Roca R. An Algorithm for the Detection and Tracking of Tropical Mesoscale Convective Systems Using Infrared Images From Geostationary Satellite. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 2013, vol. 51, pp. 4302-4315.
8. Fiorio C., Gustedt J. Two linear time Union-Find strategies for image processing. *Theoret. Comp. Sci.*, 1996, vol. 154, pp. 165-181.
9. Fitzgibbon A. A Buyer's Guide to Conic Fitting. Proc. 5th British Machine Vision Conference, 1995, pp. 51.1-51.10.
10. Han L., Fu S., Zhao L., Zheng Y., Wang H., Lin Y. 3D Convective storm identification, tracking and forecasting – an enhanced TITAN algorithm. *J. Atm. Ocean. Tech.*, 2009, vol. 26, pp. 719-732.
11. Johnson J.T., Mackeen P.L., Witt A., Mitchell E.D., Stumpf G.J., Eilts D., Thomas K.W. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Wea. Forecast.*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 263-276.
12. Kuo K.S., Welch R.M., Weger R.C. The three-dimensional structure of cumulus clouds over the ocean. 1. Structural analysis. *J. Geophys. Res.*, 1993, vol. 98, pp. 20685-20711.
13. Lakshmanan V., Smith T. An objective method of evaluating and devising storm-tracking algorithms. *Wea. Forecast.*, April 2010, Vol. 25, no. 2, pp. 701-709.
14. Matthee R., Mecikalski J.R. Geostationary infrared methods for detecting lightning-producing cumulonimbus clouds. *J. Geophys. Res.*, 2013, Vol. 118, pp. 6580-6592.
15. Mecikalski J.R., MacKenzie W.M., Koenig M., Muller S. Cloud-Top Properties of Growing Cumulus prior to Convective Initiation as Measured by Meteosat Second Generation. Part I: Infrared Fields. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2010, vol. 49, pp. 521-534.
16. Mecikalski J.R., Bedka K.M. Forecasting Convective Initiation by Monitoring the Evolution of Moving Cumulus in Daytime GOES Imagery. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, vol. 134, pp. 49-78.
17. Merk D., Zinner T. Detection of convective initiation using Meteosat SEVIRI: implementation in and verification with the tracking and nowcasting algorithm Cb-TRAM. *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, vol. 6, no. 8, pp. 1903-1918.
18. Morel C., Senesi S. A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. II: Characteristics of European mesoscale convective systems. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2002, vol. 128, pp. 1973-1995.
19. Nair U.S., Rushing J.A., Ramachadran R.K., Kuo S., Welch R.M., Graves S.J. Detection of cumulus cloud fields in satellite imagery. Proc. of SPIE Conference on Earth Observing Systems IV. Denver, CO, SPIE, 2019, pp. 345-355.

20. Papadimitriou C.H. On the complexity of integer programming. *J. ACM.*, October 1981, vol. 28, no. 4, pp. 765-768.
21. Reinhardt B., Dotzek N. Validation of the MSG Convection Initiation Product (Final Report). *EUMETSAT Technical Reports*, 2010.
22. Schmetz J., Pili P. An Introduction to METEOSAT Second Generation (MSG). *BAMS*, 2002, pp. 977-992.
23. Silva Neto C.P., Alves Barbosa H., Assis Beneti C.A. A method for convective storm detection using satellite data. *Atmósfera*, 2016, vol. 29, no. 4, pp. 343-358.
24. Wu K., Otoo E., Shoshani A. Optimizing connected component labeling algorithms. Paper LBNL-56864 Lawrence Berkeley National Laboratory (University of California), 2005.
25. Xing J., Ai H., Lao. S. Multi-object tracking through occlusions by local tracklets filtering and global tracklets association with detection responses. *Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009, pp. 1200-1207.
26. Zinner T., Mannstein H., Tafferner A. Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2008, vol. 101, pp. 191-210.

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

Received by the editor 20.05.2020.

УДК 551.509+551.501.8:351.814.2

Диагноз и прогноз циклогенеза по данным спутникового зондирования атмосферы

Л.М. Акимов¹, И.П. Расторгуев², А.Н. Неижмак³

¹*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия;*

²*Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия», Воронеж, Россия;*

³*Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков, Краснодар, Россия
akl63@bk.ru*

Представлен подход к прогнозированию возникновения внетропических циклонических вихрей на основе интерпретации цифровых данных полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA. Обработка данных производилась с использованием специализированного программного обеспечения HPTReeder. На основе анализа распределения яркостных температур на верхней границе облачности и прилегающей подстилающей поверхности определены особенности спектров отраженного излучения основных форм облачности. Разработан алгоритм обработки первичных данных. Получены диагностические и прогностические правила для определения текущего циклогенеза и его краткосрочного прогноза по цифровым спутниковым данным. Представленная методика ориентирована на использование ведомственными метеорологическими подразделениями при обеспечении государственной авиации в условиях ограниченной исходной метеорологической информации

Ключевые слова: внетропические циклоны, циклогенез, цифровая спутниковая информация, диагноз и прогноз синоптических условий, метеорологическое обеспечение, государственная авиация, безопасность полетов

DOI: doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-60-78

Cyclogenesis diagnosis and forecasting from satellite data

L.M. Akimov¹, I.P. Rastorguev², A.N. Neizhmak³

¹*Voronezh State University, Voronezh, Russia;*

²*Air Force Military Training and Scientific Center «Air Force Academy», Voronezh, Russia;*

³*Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots, Krasnodar, Russia
akl63@bk.ru*

An approach to forecasting the occurrence of extratropical cyclones based on the interpretation of digital data from NOAA polar-orbiting meteorological satellites is presented. Data processing is performed using specialized HPTReeder software. Based on the analysis of the distribution of brightness temperature at the cloud top and on the underlying surface, the features of the reflected radiation spectra are determined for the basic cloud forms. An algorithm for processing raw data is developed. Diagnostic and prognostic rules are obtained for determining the current cyclogenesis and its short-term forecast based on digital satellite data. The presented methodology is focused on the use by departmental meteorological units in supporting state aviation under conditions of limited initial meteorological information.

Keywords: extratropical cyclones, cyclogenesis, digital satellite data, diagnosis and forecast of synoptic conditions, meteorological support, state aviation, flight safety

Введение

Снижение рисков влияния погодных условий является одной из актуальных проблем во многих отраслях экономики, обеспечения безопасности и обороноспособности государства. Наиболее сложные метеорологические условия связаны с циклонами и атмосферными фронтами. В области циклонической циркуляции наблюдается наибольшая повторяемость и максимальная интенсивность опасных явлений погоды и сочетания неблагоприятных метеорологических условий.

Наиболее сложными для прогнозирования метеорологических условий являются синоптические ситуации, связанные с возникновением новых барических образований.

Существующие гидродинамический, физико-статистический и синоптические подходы к прогнозу возникновения циклонов получили широкое распространение, адаптированы к особенностям местных физико-географических условий и показывают достаточно высокую успешность. Научные исследования, направленные на дальнейшее изучение физических механизмов циклогенеза и совершенствования его прогнозирования, продолжаются как в нашей стране, так и за рубежом [13–15, 19–21, 23, 25].

Несмотря на постоянное техническое и организационное совершенствование авиационной инфраструктуры, эффективность и безопасность деятельности авиационного транспорта по-прежнему существенно зависят от метеорологических условий. Совершенствованию метеорологического обеспечения авиационного потребителя посвящено значительное количество фундаментальных и прикладных исследований [3, 6, 8, 10, 22, 23]. Большинство указанных исследований ориентировано на обеспечение гражданской и коммерческой авиации и возможности авиационных метеорологических станций (АМСГ).

При метеорологическом обеспечении государственной, в частности военной, авиации не всегда представляется возможным использование современных научных достижений и оперативной продукции гидрометеорологических центров. Особенно актуальна данная проблема в условиях ограничения исходной информации над обширными водными пространствами, в горной и пустынной местности, а также в условиях локальных военных конфликтов.

Одно из направлений совершенствования подходов к прогнозу циклогенеза, с учетом специфики деятельности ведомственных метеорологических подразделений, является дальнейшее совершенствование технологий использования результатов дистанционного зондирования Земли специализированными метеорологическими аппаратами из космоса. Космические методы исследований в метеорологии последние десятилетия получили широкое распространение в оперативной и научной деятельности метеорологических подразделений как у нас в стране, так и за рубежом [2, 4, 7, 8, 18, 26, 27].

Наряду с получением первичной метеорологической информации об атмосферных процессах и явлениях, о характеристиках состоянии земной поверхности, одной из основных задач космических методов исследований в метеорологии является разработка способов дешифрирования информации с метеорологических искусственных спутников Земли и использование этой информации для анализа и прогноза погоды.

Исходя из изложенного, целью исследования было определено создание методики прогнозирования циклогенеза на основе спутниковой информации в интересах совершенствования метеорологического обеспечения государственной авиации.

Достижение поставленной цели осуществлялось на основе решения следующих задач:

1. Исследование возможности выделения основных форм облачности и облачных систем на основе интерпретации цифровой информации со специализированных космических аппаратов.

2. Разработка качественных правил определения процессов циклогенеза по характеристикам отраженного излучения облачной и земной поверхности на основе графоаналитического подхода.

3. Выработка объективных способов выделения на цифровых спутниковых снимках облачных систем, соответствующих зарождающимся циклоническим вихрям.

На вооружении метеорологических подразделений Министерства обороны и других силовых ведомств находятся пункты приема и обработки спутниковой информации серии «Сюжет» различных поколений. Программные и аппаратные возможности их постоянно совершенствуются. В качестве методического обеспечения данных комплексов разработаны алгоритмы диагноза и прогноза метеорологических величин и явлений погоды на основе спутниковой информации [1, 5, 9, 11, 12, 16, 17], получившие применение при оперативном метеорологическом обеспечении военной авиации. Результаты указанных разработок легли в основу настоящего исследования.

Из-за существенного отличия физических процессов облакообразования в различные сезоны года для отработки методики был определен только теплый период года.

Методы и результаты исследования.

Распознавание облачности по цифровым спутниковым снимкам

По спутниковым снимкам, в том числе и в цифровом формате, не представляется возможным непосредственно обнаружить очаг падения атмосферного давления, приводящий к возникновению нового циклонического вихря. Поэтому прогноз циклогенеза осуществляется по характерным признакам эволюции облачных систем [5, 18].

Распознавание форм облачности – одна из наиболее распространенных задач обработки данных спутникового зондирования.

На основе анализа экстремальных значений радиационной температуры и альbedo на верхней границе облачности был разработан способ

идентификации конвективной облачности в массиве фронтальных слоистообразных облаков, связанных с возникновением конвективных явлений аномальной интенсивности [9]. Исследование проводилось на архивных данных полярно-орбитальных спутников серии NOAA с перспективой последующей адаптации разработанной методики к данным отечественных космических аппаратов «Метеор».

Возможности использования цифровой спутниковой информации существенно расширяются при рассмотрении не только экстремумов, но и распределения измеряемых сканируемых поверхностей в целом. Для реализации этих возможностей была проведена обработка цифровых снимков облачности и подстилающей поверхности за период с мая по сентябрь над европейской территорией России. Использовались данные выборочно за период 2006–2015 гг. Всего было обработано более тысячи фрагментов с пространственными размерами 200–250 км с наличием различной текстуры и мезоструктуры облачности.

Были использованы данные сканирующего радиометра AVHRR метеорологических спутников серии NOAA. Имея пространственное разрешение 1,1 км, они обладают высоким радиометрическим разрешением. Чувствительность AVHRR позволяет различить 1024 значения спектральной яркости (градации фототона) [25].

Прибор AVHRR производит измерение собственного теплового излучения Земли и отраженного солнечного излучения в пяти спектральных каналах: *ch1* – 0,58–0,68 мкм (видимый диапазон), *ch2* – 0,72–1,0 мкм (граница видимого и ближнего ИК-диапазона), *ch3* – 3,55–3,93 (на некоторых радиометрах – 1,5–1,6) мкм (средний ИК-диапазон), *ch4* – 10,3–11,3 и *ch5* – 11,5–12,5 мкм (дальний ИК-диапазон).

Многоканальность позволяет получать высокоточные сведения об альбедо (точность 0,5 %) и радиационной температуре сканируемой поверхности (точность 0,12 °C при $T = 27$ °C). С целью регистрации сигнала от исследуемых поверхностей (суша, вода, облачность), минимально ослабленного при прохождении через атмосферу, спектральные диапазоны каналов приходятся на окна прозрачности атмосферы [25].

Примеры типичных изображений облачности на спутниковых снимках и соответствующие им спектры характеристик яркости изображения – альбедо и яркостной температуры (в дальнейшем – спектров яркости) – показаны на рис. 1–5.

Графические изображения, представленные на рисунках, приведены в исходном виде, получаемом с помощью штатного программного обеспечения. Для каждого из пяти каналов (*ch1* – *ch5*) на горизонтальной оси графиков отложены номера градаций яркости (минимального диапазона фототона, различимого аппаратурой): в начале шкалы отображаются самые темные участки поверхности, в конце – имеющие наибольшую яркость. На вертикальной шкале отложены относительные повторяемости градаций яркости отражающей поверхности: градация яркости, имеющая наибольшую повторяемость в единичных участках выделенного

фрагмента, имеет значение 99 % (100 % с учетом градации «0» – отсутствующих на фрагменте значений). Все остальные повторяемости приведены в долях (процентах) относительно модального значения.

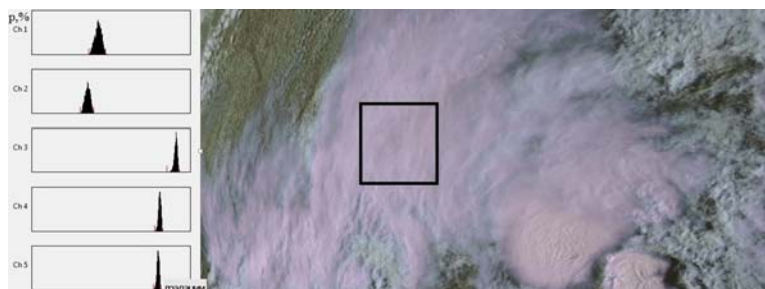


Рис. 1. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника многослойной фронтальной облачности.

Fig. 1. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view layered front clouds.



Рис. 2. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника слоисто-кучевой (закрытые ячейки), кучевой и мощно-кучевой облачности (открытые ячейки).

Fig. 2. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view layered cumulus (closed cells) cumulus and thick cumulus clouds (open cells).

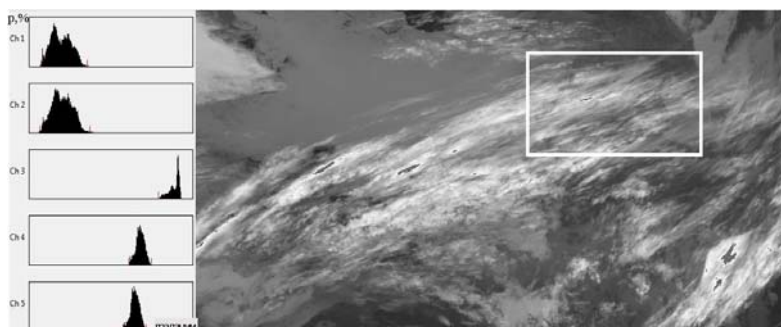


Рис. 3. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника перистых (волокнисто-образных) облаков.

Fig. 3. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view cirrus (fibrous) clouds.

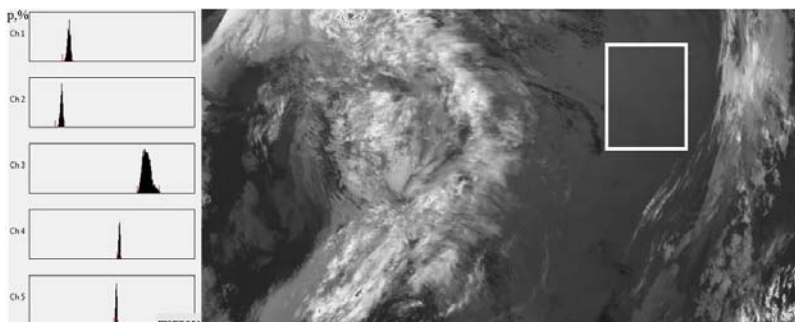


Рис. 4. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника слоистых облаков.

Fig. 4. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view layered clouds.

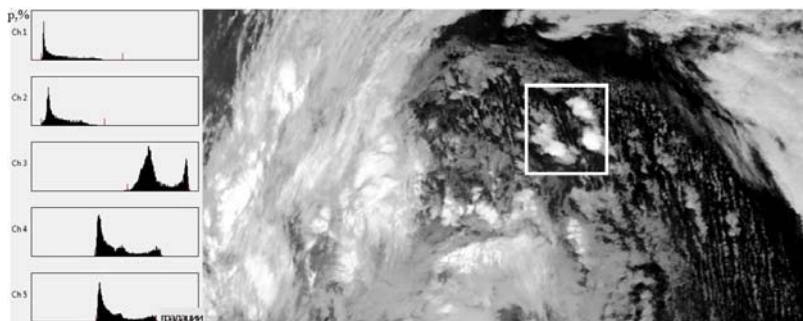


Рис. 5. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника внутримассовых кучево-дождевых облаков.

Fig. 5. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view Cumulonimbus air mass clouds.

В процессе анализа распределения яркостей учитывались:

- положение гистограмм на шкале градаций яркости (характеризующих диапазон высот отражающих поверхности);
- форма (скупенность – растянутость) гистограмм (однородность поверхности);
- положение экстремумов (вертикальная разнесенность слоев облачности);
- соотношение повторяемостей градаций яркости в разных участках спектра (распределение отражательных поверхностей в вертикальной плоскости).

Классификация облачности осуществлялась методом экспертного анализа по типовым изображениям спектров яркости и приведенным выше характеристикам.

Для определения соответствия классификации фактическим данным использовались приземные кольцевые карты погоды за квазисинхронные сроки наблюдений. Результаты проведенной классификации представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты классификации компонентов облачных систем по спектральным яркостям сканируемых поверхностей (в % к общему количеству)

Table 1. Classification results of cloud system components according to spectral brightness's of scanned surfaces (in % of the total number)

Облачность	Правильно классифицирована, %	Определено при отсутствии, %	Пропущено при наличии, %	Общее количество случаев в классе, %	Успешность определения, %
Многослойная фронтальная облачность	15,1	1,3	2,4	18,8	80,3
Кучевая и мощно-кучевая облачность	15,5	3,6	2,2	21,4	72,4
Перистые облака	13,5	0,9	2,0	16,4	82,3
Слоистые облака	10,3	2,2	1,7	14,2	72,5
Внутримассовые кучево-дождевые облака	11,6	1,6	0,3	13,5	85,9
Не классифицировано	15,7				—
Среднее					78,7 %

В табл. 1 за 100 % принято количество всех рассматриваемых случаев. В качестве критерия качества классификации использовалось отношение количества случаев правильной классификации к общему количеству случаев с данным классом облачности.

Из приведенных результатов видно, что для отдельных классов облачности успешность классификации составила от 72,4 % (кучевая и мощно-кучевая облачность) до 85,9 % (внутримассовые кучево-дождевые облака). В первом случае ошибки были вызваны сложностью отделения слабо развитых по вертикали конвективных облаков от слоисто-кучевой и высоко-кучевой облачности. Внутримассовые кучево-дождевые облака не маскируются другими формами облаков и хорошо выделяются на фоне подстилающей поверхности. Общая успешность классификации (без случаев отказа от классификации) составила 78,7 %.

Таким образом, показана возможность классификации облачности по качественному анализу цифровых данных, полученных со специализированных космических аппаратов.

Диагноз циклогенеза по цифровой спутниковой информации

На следующем этапе исследования решалась задача диагноза возникновения циклонов (циклогенеза).

До недавнего времени для синоптического анализа использовалась аналоговая спутниковая информация: на снимках видимого и инфракрасного диапазона определяются типичные изображения облачности (текстура, яркость изображения), характерные для начального периода возникновения новых барических образований циклонического типа: у точки окклюзии и на фронтальной волне (рис. 6).

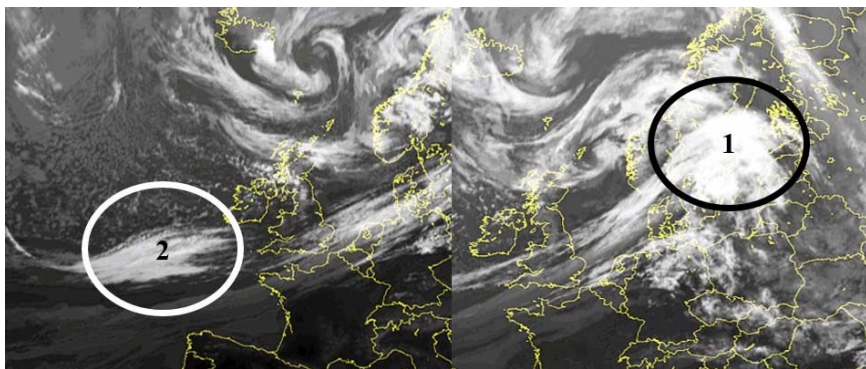


Рис. 6. Циклогенез на аналоговом спутниковом ИК-изображении:

1 – у точки окклюзии, 2 – на фронтальной волне.

Fig. 6. Cyclogenesis in the analogue satellite infrared image:

1 - at the point of occlusion, 2 - on the frontal wave.

Успешность реализации данного подхода зависит от субъективных факторов и не всегда удовлетворяет требованиям по точности и оправданности.

На смену субъективному визуальному анализу пришли цифровые технологии на базе специализированных комплексов обработки спутниковой информации. В ведомственной метеорологической службе Министерства обороны Российской Федерации используются системы серии «Сюжет» со специализированным программным обеспечением «Актомика» и HPTReeder. Первая из указанных программных оболочек в основном ориентирована на представление конечного продукта и эффективно зарекомендовала себя в оперативной работе. HPTReeder поставлялась с аппаратным комплексом предшествующего поколения «Сюжет-МЦ» и имеет большой потенциал для исследовательских целей.

Было проведено исследование более тридцати случаев с обстановкой, благоприятной для образования циклона у точки окклюзии, и более 50 случаев – на фронтальной волне. Всего было проанализировано

87 случаев теплого периода года (май – сентябрь) над территорией Европы и умеренных широт Атлантики. При этом образование циклонов (по данным наземных наблюдений) происходило в 39 случаях.

Для каждого случая были построены распределения относительных значений повторяемости градаций яркости (яркостных температур) подспутниковых поверхностей по пяти спектральным каналам (рис. 7) и рассчитаны статистические характеристики распределений: средние и экстремальные значения, квантили 95 и 75, дисперсии, размах, асимметрии и эксцессы.

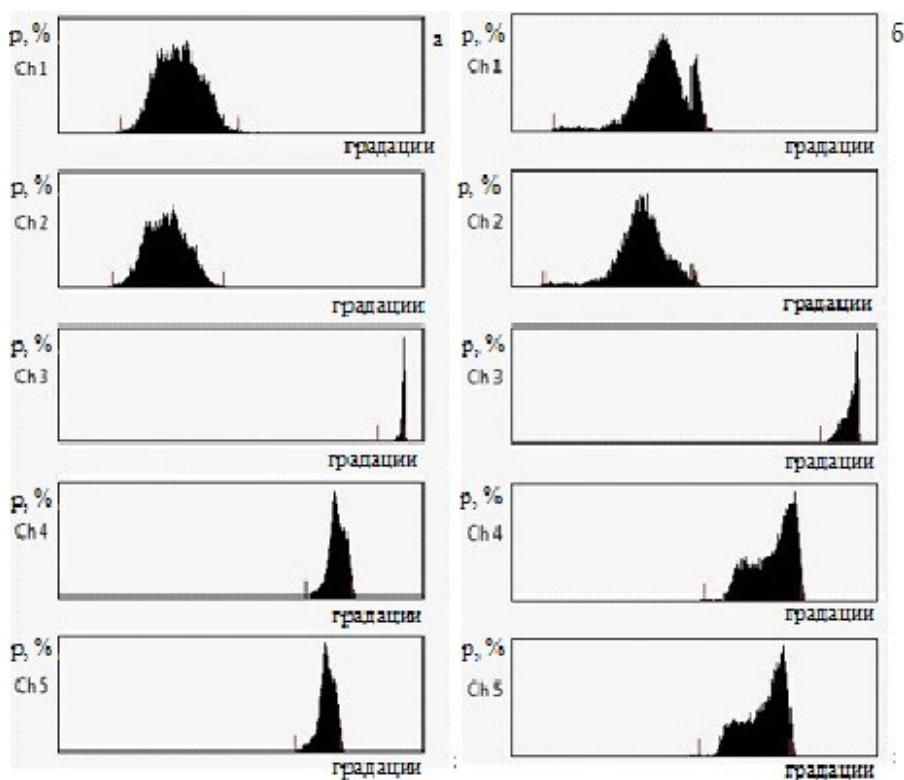


Рис. 7. Примеры типичных спектров яркостных температур подспутниковой поверхности при циклогенезе: на фронтальной волне (а) и у точки окклюзии (б) в графическом виде.

Fig. 7. Examples of typical spectra of brightness temperatures of the sub-satellite surface: during frontal wave cyclogenesis (а) and at the occlusion point (б) in graphical form.

Таким образом, на основе компьютерной обработки с использованием специализированного программного обеспечения получены статистические модели яркостной отражаемости на верхней границе облачных фронтальных систем на участках циклогенеза.

Для более детального анализа однородности (неоднородности) характеристик распределения яркостей по классам «наличия-отсутствия» условий циклогенеза были рассчитаны критерии Фишера и Стьюдента проверки гипотез о равенстве дисперсий и средних значений распределений. Значения указанных критериев подтвердили гипотезу о «разделимости» случаев с наличием и отсутствием циклогенеза.

Проверка практической реализации данных моделей, проводилась на независимой выборке из случаев с благоприятными условиями для циклогенеза у точки окклюзии и на фронтальной волне (21 и 27 случаев соответственно). При этом в 9 случаях на фронтальной волне и в 12 случаях у точки окклюзии, развивался процесс циклогенеза.

По критерию максимального соответствия распределения яркостных температур на верхней границе облачности одному из двух классов (с развитием циклогенеза и с его отсутствием или затуханием) формировалось прогностическое заключение для каждой реализации контрольной выборки.

Успешность классификации составила для первой синоптической ситуации (у точки окклюзии) – 90,5 %, для второй (на фронтальной волне) – 88,9 %. Данные показатели существенно превышают показатели оправдываемости прогноза циклогенеза, проведенного методом экспертных оценок с помощью аналоговых спутниковых снимков (71,4 %, и 74,1%).

Приведенный сравнительный анализ критериев успешности подходов к диагнозу циклогенеза свидетельствует о перспективности компьютерного моделирования процессов циклогенеза по цифровым данным специализированных метеорологических космических аппаратов.

В качестве факторов, снижающих качество результатов классификации ситуаций, следует отметить отсутствие возможности выделять для анализа на спутниковых снимках площади со сложной конфигурацией (отличной от прямоугольной). По этой причине в анализ включаются области с нефронтальной облачностью и открытые участки подстилающей поверхности, что вносит искажения в распределения градиций яркости и приводит к отдельным ошибкам классификации.

Разработка прогностических правил прогноза циклогенеза по спутниковым данным

Как и при проведении диагностики циклогенеза, для получения исходных данных использовалась программа HRPTreader. По приземным картам определялись случаи образования фронтальных циклонов на волне холодного фронта или у точки окклюзии. За квазисинхронные сроки подбирались цифровые спутниковые снимки. В архивную выборку также включались случаи с благоприятными условиями, когда циклогенез не происходил.

По каждому каналу, аналогично предшествующему этапу, выполнялось выделение фрагментов и построение гистограмм повторяемости альbedo и яркостной температуры с последующим преобразованием из графического в цифровой формат.

На следующем шаге исследования были построены распределения нормированных повторяемостей градаций яркости на верхней границе сканируемой поверхности (рис. 8).

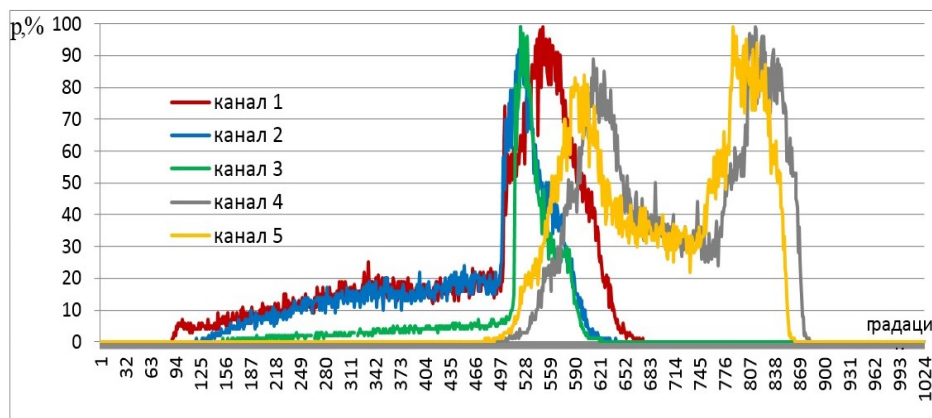


Рис. 8. Пример комплексного графического представления распределения нормированных повторяемостей градаций яркости сканируемой поверхности на разных каналах.

Fig. 8. An example of a complex graphical representation of the distribution of normalized frequency of gradations of brightness of a scanned surface on different channels.

На каждом фрагменте определялась синоптическая ситуация: волна либо точка окклюзии, а также степень проявления циклогенеза в выделенной зоне в ближайшие 6 часов: 0 – отсутствует, 1 – слабо выражен, 2 – выражен.

Далее для всех снимков определялись различные параметры для каждого пика и всего спектра в целом в каждом из 5 каналов (n-номер канала):

k_{IN} – количество пиков (всплесков) – показывает количество выраженных слоев облачности;

$k_{n \min}$ – минимум канала – номер наименьшей градации яркости, характеризующий наибольшее значение температуры (в 3–5 каналах) и наименьшее значение альbedo (на 1–2 каналах) отражающей поверхности;

$k_{n \max}$ – максимум канала – номер наибольшей градации яркости, характеризующий наименьшее значение температуры (в 3–5 каналах) и наибольшее значение альbedo (на 1–2 каналах) отражающей поверхности;

$k_{n \text{ mod}}$ – среднее значение (разность между минимальным и максимальным значением спектра) – характеризует положение распределения на оси градаций яркости;

Δk_n – размах спектра (расстояние от минимума до максимума) – характеризует однородность отражающей поверхности (большому значению соответствует расслоенность облачности и наличие просветов в облаках – просматривается поверхность земли);

$k_{n-1 \text{ min}}$ – начало пика – номер наименьшей градации яркости конкретного всплеска, характеризующий наибольшее значение температуры или наименьшее значение альbedo отражающей поверхности на канале;

$k_{n-1 \text{ max}}$ – конец пика – номер наибольшей градации яркости конкретного всплеска, характеризующий наименьшее значение температуры или наибольшее значение альbedo отражающей поверхности на канале;

$k_{n-1 \text{ pik}}$ – наибольшее значение пика – значение преобладающей градации яркости, характеризующей уровень верхней границы основного слоя облачности (ВВГО);

Δk_{n-1} – расстояние от начала до конца пика – показатель однородности (сплоченности) облачного слоя;

$k_{n-1 \text{ pic+}}$ – разность между наибольшим значением пика и началом пика;

$k_{n-1 \text{ pic-}}$ – наибольшее значение пика – характеризует наибольшее значение ВВГО слоя;

$k_{n-1 \text{ скос}} = (k_{1-1 \text{ max}} - k_{1-1 \text{ pik}}) - (k_{1-1 \text{ pik}} - k_{1-1 \text{ min}})$ – характеристика скошенности слоя, косвенно характеризующая разность между «провисаниями» и выступами («шапками») слоя;

$k_{n-1 \text{ скос}^*} = (k_{1-1 \text{ max}} - k_{1-1 \text{ pik}})/(k_{1-1 \text{ pik}} - k_{1-1 \text{ min}})$ – аналогичная характеристика распределения, выраженная через отношение пониженных и повышенных участков слоя облачности или подстилающей поверхности.

По анализу спектров можно сделать следующие пояснения.

1. Рассчитываемые величины не являются исчерпывающими характеристиками облачных слоев. Излучение в рассматриваемых диапазонах не проникает внутрь облака и несет информацию только о верхней границе самого верхнего слоя и не перекрываемых участков нижерасположенных слоев облачности и подстилающей поверхности Земли.

2. Искажение значений ВВГО возможно за счет наличия инверсий температуры и наблюдается, как правило, в приземном слое и выше тропопавузы (поэтому значительно не влияет на анализ облачных систем атмосферных фронтов и циклонов).

3. Чем выше яркостная температура (спектр сдвинут вправо), тем выше ВВГО слоя облачности.

4. Следует учитывать также расстояние между пиками спектра: чем больше расстояние между пиками, тем больше разность высот между слоями облачности.

5. При отсутствии всплеска в начале спектра поверхность Земли не просматривается, что свидетельствует о наличии сплошной облачности.

6. Большое значение имеет форма всплеска спектра. Острый пик, свидетельствующий о большой повторяемости градаций яркости в узком диапазоне, означает однородную верхнюю границу отражающей поверхности, а широкий всплеск означает неоднородность верхней границы слоя.

Для построения решающего правила была проведена процедура дискриминантного анализа. В результате проведения данной статистической процедуры был отобран всего один предиктор Δk_2 – ширина основного всплеска (в количестве градаций) на 2-м спектральном канале. Дальнейшее увеличение размерности функции (привлечение дополнительной информации) не привело к статистически значимому увеличению критериев успешности прогностического правила.

Методом дискриминантного анализа были определены параметры прогностической дискриминантной функции:

$$L = 0,02733\Delta k_2 - 10,39217. \quad (1)$$

Таким образом, решающее правило прогноза циклогенеза по спутниковым данным можно сформулировать следующим образом: образование циклона следует ожидать (указывать при прогнозе синоптического положения) в случае отрицательного значения функции L ($L \leq 0$).

Из равенства (1) определено критерияльное значение $\Delta k_{2_кр} = 380,2$, т. е. при ширине основного всплеска, во втором спектральном диапазоне (канале) до 380 градаций яркости, следует прогнозировать циклогенез, при больших значениях – его отсутствие.

Ключевым параметром в определении благоприятных условий для циклогенеза оказалась характеристика однородности верхней границы – сплоченности облачной системы.

Критерии успешности (оправдываемости на наличие, на отсутствие, общая оправдываемость) дискриминации по полученному решающему правилу представлены в табл. 2.

Из анализа результатов, представленных в табл. 2 видно, что оправдываемость прогноза циклогенеза по контрольной выборке существенно не снизилась по сравнению с обучающей выборкой и имеет приемлемые значения для практического использования.

В качестве примера, иллюстрирующего зависимость исследуемого процесса от выбранного предиктора, приведены яркостные спектры типичных случаев с наличием и отсутствием циклогенеза, представленные на рис. 9.

Таблица 2. Матрица классификации облачных систем на наличие условий циклогенеза с использованием дискриминантного анализа

Table 2. Classification matrix of cloud systems for cyclogenesis conditions using discriminant analysis

Оправды- ваемость	Прогноз					
	Обучающая выборка		Доля правильной классифика- ции	Контрольная выборка		Доля правильной классифика- ции
	Правиль- но	Ошибоч- но		Правиль- но	Ошибоч- но	
Наличия	25	4	86,2	13	2	86,7
Отсутствия	12	2	85,7	5	1	83,3
Общая	37	6	86,0	18	3	85,7

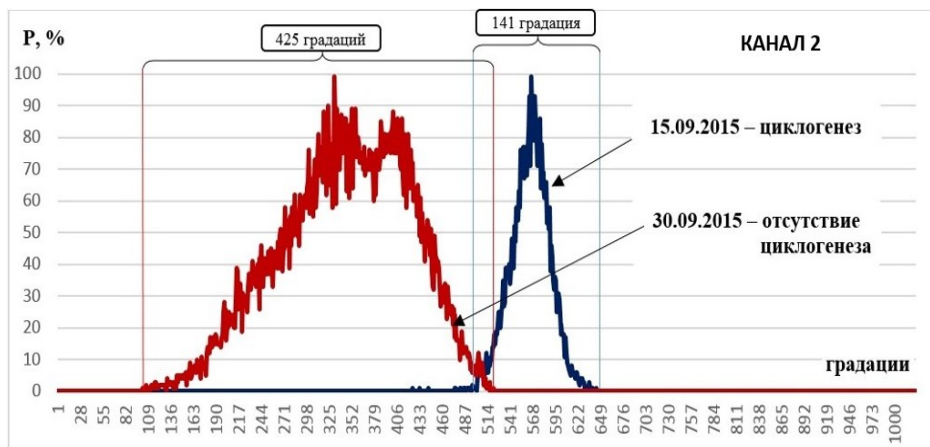


Рис. 9. Пример сравнительного анализа спектров яркости на 2-м канале, применительно к разработанному способу прогноза циклогенеза по цифровым спутниковым данным.

Fig. 9. An example of a comparative analysis of the luminance spectra on channel 2, as applied to the developed method for predicting cyclogenesis using digital satellite data.

Схематично методика прогноза циклогенеза с использованием спутниковых данных изображена на рис. 10.

Представленная методика диагноза и прогноза циклогенеза на основе спутниковых технологий без адаптации может применяться только в указанный период года. Прогностические правила и алгоритм их использования также могут быть реализованы для других регионов со сходными физико-географическими условиями. Необходимыми предварительными

процедурами при этом является их проверка на местном аэросиноптическом материале и соответствующих данных спутникового зондирования с последующей адаптацией по приведенному алгоритму. Критерием правильности классификации факта «наличия-отсутствия» циклогенеза, с использованием предлагаемой методики, выступает синоптическая обстановка, определяемая с помощью аэросиноптического материала.



Рис. 10. Схема методики прогноза циклогенеза по спутниковыми данным.

Fig. 10. Scheme of the methodology for predicting cyclogenesis prediction from satellite data.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана методика и произведена оценка успешности распознавания облаков на спутниковых снимках путем сравнения полученных изображений с эталонными типами. Общая успешность классификации различных типов облаков с применением данного подхода составила 78,7 %. Наилучшее распознавание облачности с вероятностью 85,9 % характерно для внутримассовых кучево-дождевых облаков. Предложенную методику рекомендуется использовать в оперативной работе в качестве предварительного анализа текущего и ожидаемого циклогенеза.

Получены методические материалы по анализу и прогнозу циклогенеза в умеренных широтах Северного полушария на основе специализированной спутниковой информации, реализованные в практической деятельности ведомственных метеорологических подразделений.

Разработанная методика диагноза и прогноза циклогенеза на основе спутниковых технологий актуальна прежде всего для районов, недостаточно освещенных в метеорологическом отношении. Применительно к военной авиации данная методика может быть использована в Заполярье и в Ближневосточном регионе при метеорологическом обеспечении группировок Воздушно-космических сил.

Список литературы

1. Акимов Л.М., Расторгуев И.П., Неижмак А.Н., Мухина Т.А. Особенности прогнозирования опасных для авиации конвективных явлений погоды над юго-востоком Африки // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 2. С. 103-110.
2. Анискина О.Г., Заболотских Е.В., Шапрон Б. Моделирование эволюции полярных циклонов с использованием данных спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 13-26.
3. Афанасьева Ю.С., Богаткин О.Г. Оценка метеорологических рисков в гражданской авиации // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 1 (14). С. 5-13.
4. Баянкина Т.М., Воскресенская Е.Н. Климатическое районирование средиземноморского региона и его особенности в поле облачности и параметрах циклонов по данным спутникового мониторинга // Системы контроля окружающей среды. 2012. № 17. С. 90-93.
5. Беспалов С.В., Неижмак А.Н., Расторгуев И.П., Савченко П.Д. Синоптическая метеорология. Синоптические объекты и процессы. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. С. 5-10, 61-69.
6. Болелов Э.А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 5. С. 117-129.
7. Верятин В.Ю., Иоффе Г.М., Воронин А.А. Космический мониторинг тропических циклонов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 23-32.
8. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 3. С. 66-74.
9. Звягинцева А.В., Расторгуев И.П., Неижмак А.Н. Мониторинг стихийных бедствий конвективного происхождения по данным дистанционного зондирования с метеорологических космических аппаратов. Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2013. 166 с.
10. Моисеева Н.О., Белоусова Л.Ю., Коваленко Г.В. Теоретические аспекты повышения эффективности метеорологического обеспечения авиаперевозок в арктическом регионе // Сб. материалов XXVII Международной береговой конференции «Арктические берега: путь к устойчивости», 2018. С. 349-352.
11. Неижмак А.Н., Звягинцева А.В., Расторгуев И.П. Распознавание опасных метеорологических явлений конвективного происхождения в интересах управления авиацией // Вестник ВГТУ. 2008. Т. 4, № 10. С. 135-139.
12. Неижмак А.Н., Расторгуев И.П. Способ определения конвективных опасных метеорологических явлений в теплый период года для европейской части территории России: Патент на изобретение RU 2385474 28.07.2008.
13. Нестеров Е.С., Похил А.Э., Федоренко А.В. Об особенностях формирования глубоких циклонов в Северной Атлантике в осенний период // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 92-101.

14. Нестеров Е.С. Экстремальные циклоны над морями европейской части России // Гидрометеорологические прогнозы (Труды Гидрометцентра России). 2018. № 1 (367). С. 97-115.
15. Калинин Н.А., Связов Е.М. Трансформация кинетической энергии в циклонах умеренных широт. Пермь: ГОУ ВПО Пермский гос. ун-т, 2008. 115 с.
16. Расторгуев И.П., Качмар М.Б., Сурков Д.А., Божко А.С. Распознавание облачных систем на основе цифровой спутниковой информации // Сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Комплексные проблемы техносферной безопасности. Ч. 3. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2017. С. 111-116.
17. Расторгуев И.П., Шулякевич Л.В., Божко А.С. Исследование метеорологических и синоптических объектов по данным специализированных космических аппаратов // Сборник статей V Международной научно-практической конференции. Комплексные проблемы техносферной безопасности. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2018. С. 66-70.
18. Толмачева Н.И., Калинин Н.А. Космические методы исследования метеорологических процессов в атмосфере // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. 2010. № 4. С. 12-23.
19. Тунеголовец В.П. Интенсивность циклогенеза во второй половине XX столетия // Труды ГУ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт. 2009. № 151. С. 140-153.
20. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976-2015 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. Вып. 364. С. 81-92.
21. Шакина Н.П., Иванова А.Р., Комасько Н.И. Современные представления об атмосферном фронтогенезе. Теоретические положения // Метеорология и гидрология. 2014. № 10. С. 5-18.
22. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 310 с.
23. Шакина Н.П. Прогноз погоды для авиации на основе продукции численных моделей атмосферы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 241-256.
24. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Диагностические исследования и моделирование процессов циклогенеза, фронтогенеза и погодных условий на различных стадиях развития циклонов // Труды Гидрометцентра России. 2000. Вып. 335. С. 3-25.
25. Comprehensive large array data stewardship system. AVHRR // NOAA. URL: https://www.avl.class.noaa.gov/release/data_available/avhrr/index.htm. (дата обращения: 21.03.2020).
26. Georgiev, C. Use of Meteosat WV channel data for detection of model analysis and forecast errors of potential vorticity fields, in 9th Conference on Satellite meteorology (Paris, 25-29 May 1998), EUM P 22, ISSN 1011-3932, EUMETSAT. P. 777-780.
27. Volkova E.V., Uspensky A.B. Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data of scanning radiometers of polar-orbiting and geostationary meteorological satellites // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52, no. 9. P. 1097-1109.

References

1. Akimov L.M., Rastorguyev I.P., Neizhmak A.N., Muekhina T.A. Peculiarities of forecasting the dangerous convective weather phenomena over the south-east of Africa. *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], 2018, vol. 2, pp. 103-110 [in Russ.].
2. Aniskina O.G., Zabolotskih E.V., Shapron B. Modelirovanie evolyucii polyarnykh ciklonov s ispol'zovaniem dannykh sputnikovoy mikrovolnovoy radiometrii. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth research from space], 2016, no. 3, pp. 13-26 [in Russ.].
3. Afanasieva Y.S., Bogatkin O.G. Assessment of meteorological risks in civil aviation. *Vestnik SPbGU GA*, 2017, vol. 14, no. 1, pp. 5-13 [in Russ.].

4. Bayankina T.M., Voskresenskaya E.N. Climatic zoning of the Mediterranean Sea region and its features manifesting the cloudiness field and cyclones' parameters based on satellite monitoring. *Sistemy kontrolya okruzhayushey sredy* [Monitoring systems of environment], 2012, no. 17, pp. 90-93 [in Russ.].
5. Bepalov S.V., Neizhmak A.N., Rastorguev I.P., Savchenko P.D. Sinopticheskaya meteorologiya. Sinopticheskie ob"ekty i process. Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2013, pp. 5-10, 61-69 [in Russ.].
6. Bolelov E.A. Meteorological service for civil aviation: problems and ways of their solution. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2018, vol. 21, no. 5, pp. 117-129. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129 [in Russ.].
7. Veryatin V.Y., Ioffe G.M., Voronin A.A. Satellite monitoring of tropical cyclones. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 369, no. 3, pp. 23-32 [in Russ.].
8. Volkova E.V. Automatic estimation of cloud cover and precipitation parameters obtained by AVHRR NOAA for day and night conditions. *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2013, vol. 10, no. 3, pp. 66-74 [in Russ.].
9. Zvyaginceva A.V., Rastorguev I.P., Neizhmak A.N. Monitoring stihnykh bedstviy konvektivnogo proiskhozhdeniya po dannym distancionnogo zondirovaniya s meteorologicheskikh kosmicheskikh apparatov. Voronezh: GOU VPO VGTU, 2013, 166 p. [in Russ.].
10. Moiseeva N.O., Belousova L.Yu., Kovalenko G.V. Theoretical Aspects of Improving the Efficiency of Meteorological Support of Air Transportation in the Arctic Region. Sb. materialov XXVII Mezhdunarodnoy beregovoy konferencii «Arkticheskie berega: put' k ustoychivosti» [Materials of the XXVII International Coastal Conference "Arctic shores: shore-up to sustainability"], 2018, pp. 349-352 [in Russ.].
11. Zvyaginseva A.V., Neizhmak A.N., Rastorguev I.P. Recognition of dangerous convective weather phenomena for aviation regulations. *Vestnik VGTU*, 2008, vol. 4, no. 10, pp. 135-139 [in Russ.].
12. Neizhmak A.N., Rastorguev I.P. Sposob opredeleniya konvektivnykh opasnykh meteorologicheskikh yavleniy v teplyy period goda dlya evropeyskoy chasti territorii Rossii: Patent na izobretenie RU 2385474 28.07.2008 [in Russ.].
13. Nesterov E.S., Pokhil A.E., Fedorenko A.V. Peculiarities of deep cyclone formation in the North Atlantic autumn. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 372, no. 2, pp. 92-101 [in Russ.].
14. Nesterov E.S. Extreme cyclones over the seas of the European part of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 367, no. 1, pp. 97-115 [in Russ.].
15. Kalinin N.A., Sviyazov E.M. Transformatsiya kineticheskoy energii v tsiklonah umerennykh shirot. Perm': GOU VPO Permskiy gos. un-t., 2008, 115 p. [in Russ.].
16. Rastorguev I.P., Kachmar M.B., Surkov D.A., Bozhko A.S. Raspoznavanie oblachnykh sistem na osnove cifrovoy sputnikovoy informatsii. Sbornik statey IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Kompleksnyye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti. Ch. 3. Voronezh, FGBOU VO VGTU, 2017, pp. 111-116 [in Russ.].
17. Rastorguev I.P., Shulyayevich L.V., Bozhko A.S. Issledovanie meteorologicheskikh i sinopticheskikh ob"ektov po dannym specializirovannykh kosmicheskikh apparatov. Sbornik statey V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Kompleksnyye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti. Voronezh, FGBOU VO VGTU, 2018, pp. 66-70. [in Russ.].
18. Tolmacheva N.I., Kalinin N.A. Kosmicheskie metody issledovaniya meteorologicheskikh processov v atmosfere. *Vestnik Permskogo nauchnogo centra UrO RAN* [Perm Federal Research Centre Journal], 2010, no. 4, pp. 12-23 [in Russ.].
19. Tunegolovets V.P. Intensivnost' ciklogeneza vo vtoroy polovine XX stoletiya. *Trudy DVNIGMI*, 2009, no. 151, pp. 140-153 [in Russ.].
20. Tunaev E.L., Gorbatenko V.P., Podnebesnykh N.V. Distinctive features of cyclogenesis over the Territory of Western Siberia during 1976–2015. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 364, pp. 81-92 [in Russ.].

21. Shakina N. P., Ivanova A.R., Komar'ko N. I. Present-day concepts of atmospheric frontogenesis. Part 1. Theoretical ideas. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 10, pp. 639–649. DOI: 10.3103/S106837391410001X.
22. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovaniye meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii. Moscow, Triada LTD publ., 2016, 312 p. [in Russ.].
23. Shakina N.P. Aviation weather forecasting based on numerical weather prediction products. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 241–256 [in Russ.].
24. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Berkovich L.V., Tkacheva Yu.V. Diagnosticheskie issledovaniya i modelirovaniye processov ciklogeneza, frontogeneza i pogodnykh usloviy na razlichnykh stadiyakh razvitiya ciklonov. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*], 2000, vol. 335, pp. 3–25 [in Russ.].
25. Comprehensive large array data stewardship system. AVHRR. NOAA. Available at: https://www.avl.class.noaa.gov/release/data_available/avhrr/index.htm.
26. Georgiev, C. Use of Meteosat WV channel data for detection of model analysis and forecast errors of potential vorticity fields, in 9th Conference on Satellite meteorology (Paris, 25–29 May 1998), EUM P 22, ISSN 1011-3932, EUMETSAT, pp. 777–780.
27. Volkova E.V., Uspensky A.B. Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data of scanning radiometers of polar-orbiting and geostationary meteorological satellites. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 2016, vol. 52, no. 9, pp. 1097–1109.

Поступила в редакцию 30.04.2020 г.

Received by the editor 30.04.2020.

УДК 534.143

Верификация модельных расчетов волнения на акватории Обской губы по данным инструментальных измерений в 2015–2017 годах

***П.В. Коробов, В.В. Алексеев, В.И. Дымов,
Н.П. Яковлева, К.Г. Смирнов***

*Арктический и антарктический научно-исследовательский
институт, г. Санкт-Петербург, Россия
wave@aari.ru*

Произведено сравнение данных численной реализации волновой модели SWAN для акватории Обской губы и данных инструментальных наблюдений, полученных лабораторией «Арктик-шельф» (ФГБУ «АНИИ») в 2015–2017 гг. Приведены результаты верификации модели SWAN по имеющимся инструментальным измерениям и статистические оценки качества результатов модельных вычислений.

Ключевые слова: ветровое волнение, численное моделирование, верификация, волновая модель SWAN

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-79-89>

Verification of model calculations of waves in the Gulf of Ob on the basis of instrumental measurement data in 2015-2017

***P.V. Korobov, V.V. Alekseev, V.I. Dymov,
N.P. Yakovleva, K.G. Smirnov***

*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
wave@aari.ru*

This article presents the results of comparing the data of the numerical implementation of the SWAN wave model for the waters of the Gulf of Ob and measurement data. The SWAN model was verified using the available instrumental measurements, and statistical assessments of the quality of the results of model calculations are given.

Keywords: wind wave, numerical modelling, verification, SWAN

Введение

Необходимость расчетов и прогнозов ветрового волнения обусловлена опасностью этого явления для судов и инфраструктуры в регионах ведения хозяйственной деятельности. Для арктических морей эта необходимость растет по мере ускорения таяния льда и большей открытости акваторий. Это в полной мере относится и к акватории Обской губы. Ввиду активной хозяйственной деятельности в этом регионе и связанного с ней интенсивного судоходства необходимы научно-обоснованные

методы прогнозирования опасных явлений на этой акватории. Для расчетов и прогнозов волнения существует ряд современных численных моделей: AARI-PD2 [1–6], SWAN [<http://www.swan.tudelft.nl>], WAVEWATCH-III [8–11], WAM [12, 13].

В настоящее время численное моделирование ветрового волнения основано на решении уравнения эволюции спектральной плотности волнового действия $N(k, \beta, \varphi, \vartheta)$, которое можно записать в виде:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial \varphi} \dot{\varphi} + \frac{\partial N}{\partial \vartheta} \dot{\vartheta} + \frac{\partial N}{\partial k} \dot{k} + \frac{\partial N}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial N}{\partial \omega} \dot{\omega} = G, \quad (1)$$

где N – функция широты φ , долготы ϑ , волнового числа k и β – угла между направлением волнового вектора и параллелью (направлением на восток), а также частоты ω и времени t ; G – функция источника, которая определяется физическими механизмами, формирующими спектр волнения. Она записывается в виде ряда компонент, из которых в основном используются следующие:

$$G = G_{in} + G_{nl} + G_{ds_1} + G_{ds_2}, \quad (2)$$

где G_{in} – поступление энергии от ветра к волнам; G_{ds_1} – диссипация волновой энергии, связанная с обрушением гребней волн; G_{ds_2} – диссипация за счет донного трения; G_{nl} – нелинейное взаимодействие в спектре ветрового волнения.

Современные математические модели расчета и прогноза ветрового волнения можно разделить по способу решения спектрального уравнения баланса волновой энергии (1) на дискретно-спектральные модели (SWAN, WAVEWATCH-III, WAM) и спектрально-параметрические модели (AARI-PD2 и др.). В дискретно-спектральных моделях в результате решения уравнения (1) определяется частотно-направленный спектр, по которому рассчитываются все параметры ветрового волнения, включая как параметры ветровых волн, так и параметры волн зыби. В спектрально-параметрической модели раздельно определяются частотно-направленные спектры ветровых волн и волн зыби, а характеристики смешанного волнения определяются как результат их взаимодействия.

Модель SWAN свободно распространяется с открытым исходным текстом программ. Она создавалась специалистами технологического университета г. Делфт (Нидерланды) специально для расчетов и прогнозов волнения на ограниченных по пространству мелководных акваториях и может учитывать взаимодействие ветра, волн, течений, уровня моря, а сейчас – еще и параметров льда. Эта модель широко используется в мире для научных, инженерных расчетов, а также в оперативной и консультационной практике. Именно поэтому в данной работе была использована одна из последних версий модели SWAN (41.31) для расчетов на мелководной акватории Обской губы.

Для обоснованного применения той или иной модели при прогнозировании волнения необходимо провести верификацию данной модели и параметров этой модели для конкретной акватории. Следует отметить, что Обская губа очень сложна для расчетов параметров волнения из-за изогнутой и вытянутой акватории. Также для корректной работы модели необходима батиметрия высокого разрешения.

В этой статье приводим результаты верификации модели SWAN для Обской губы, предполагая, что для этой акватории возможно использование и других моделей.

1. Описание входных данных, данных измерений и параметров модели

Инструментальные наблюдения в акватории Обской губы были получены лабораторией «Арктик-шельф» в 2015 и 2016 гг. в точке 71° с. ш., $73,56^{\circ}$ в. д. и в 2017 г. в точке $70,972^{\circ}$ с. ш., $73,781^{\circ}$ в. д. (рис. 1).

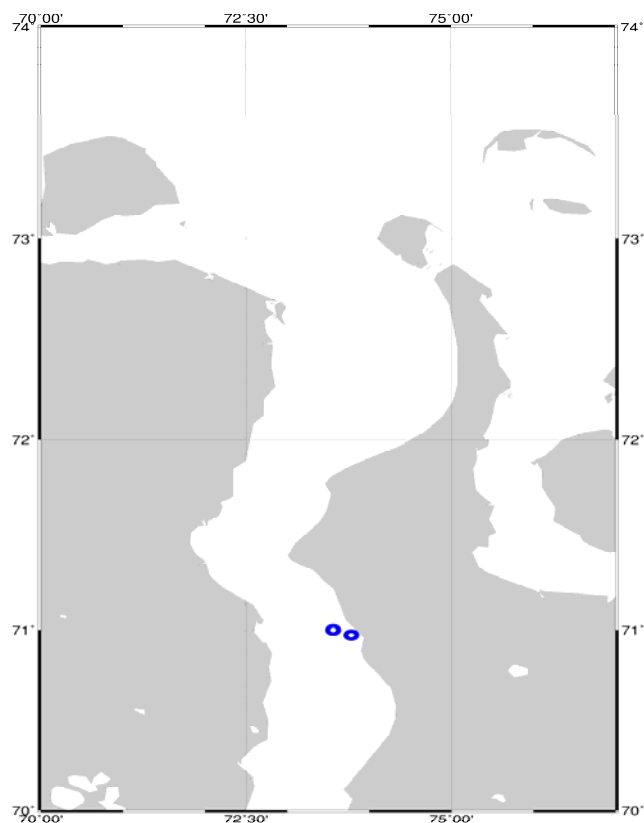


Рис. 1. Расположение донных станций в акватории Обской губы.

Fig. 1. Location of bottom stations in the waters of the Gulf of Ob.

Наблюдения проводились посредством установленных в составе автономных донных станций акустических доплеровских профилографов течений AWACAST 600 (производства компании Nortec, Норвегия), с функцией измерения волнения и его параметров (высота, период и направление волн).

Численное моделирование волнения осуществляется на основе следующих данных: скорость и направление ветра, сплоченность льда, батиметрия. В данной работе для получения данных о ветре и сплоченности льда использовался реанализ ERA-5 за 2015-2017 гг. с горизонтальным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Данные ветра использовались с дискретизацией по времени 1 час, временная дискретизация для льда – 1 сутки. Детальная батиметрия уточнялась сотрудниками лаборатории «Арктик-шельф». Глубина на входе в Обскую губу в среднем составляет 20 м. В точках проведения измерений глубины составили 22 м (71° с. ш., $73,56^\circ$ в. д.) и 6 м ($70,97^\circ$ с. ш., $73,78^\circ$ в. д.).

Параметры волнения рассчитывались волновой моделью SWAN версии 41.31 с использованием вложенных сеток. Сначала проводились вычисления для «внешней» области, представляющей из себя всю акваторию Северного Ледовитого океана (СЛО) с разрешением $0,75^\circ \times 0,25^\circ$. Граничные условия из «внешней» сетки передавались во вложенную расчетную сетку с разрешением 3×1 минут, ограниченную областью $66\text{--}74^\circ$ с. ш., $70\text{--}77^\circ$ в. д.

На рис. 2–4 приведены расчетные сетки для общего расчета в СЛО и для вложенной сетки Обской губы, а также пример расчета.

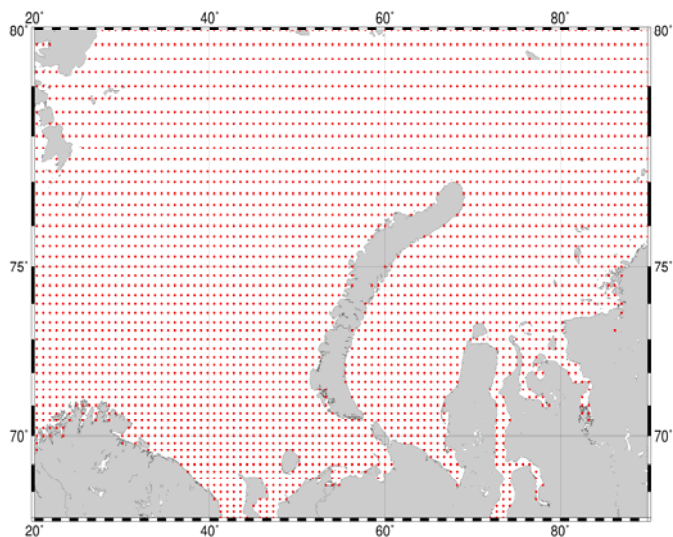


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки расчета параметров волнения на акватории СЛО.

Fig. 2. A fragment of the computational grid for calculating the parameters of the waves in the water area of the Arctic Ocean.

Приведем краткое описание используемых параметров модели SWAN.

Для «внешней» сетки акватории СЛО применялся режим GEN3 с параметрами:

- схема роста KOMEN ($cds2=2.36e-5$, $stpm=3.02e-3$);
- трех- и четырехволновое взаимодействие (Quadrupl, Triad);
- обрушение (Breaking constant, $\alpha=1.0$, $\gamma=0.73$);
- донное трение (Friction Jonswap Constant $cf=0.067$).

При расчете на «внешней» сетке учитывался параметр AICE, который доступен в версии SWAN 41.31 и характеризует сплоченность льда.

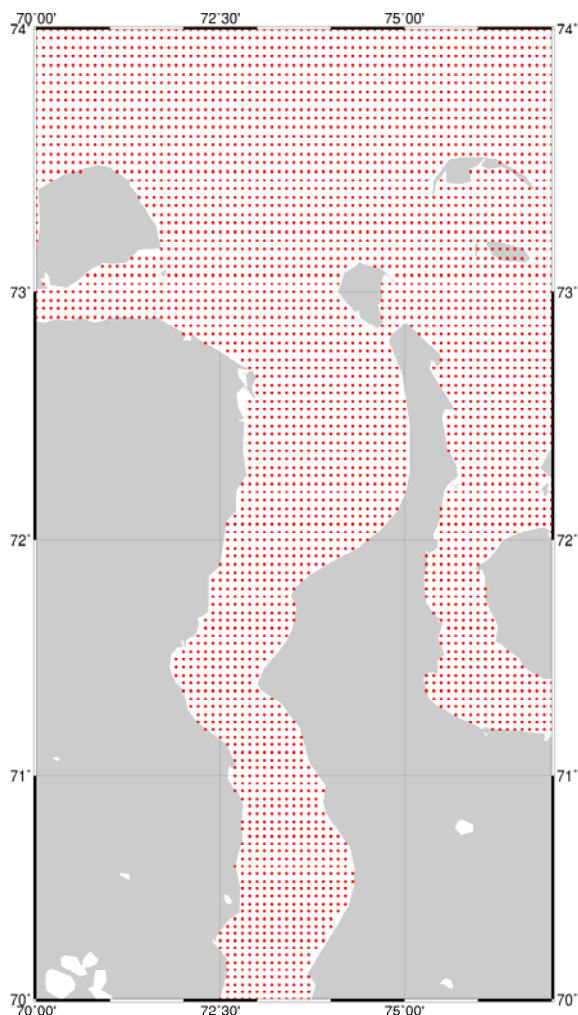


Рис. 3. Вложенная расчетная сетка для Обской губы.
Fig. 3. Nested grid for Gulf of Ob.

Расчет параметров волнения для вложенной сетки в акватории Обской губы производился в режиме GEN2 со следующими параметрами:

- коэффициент линейного роста волн $cf10=188$;
- коэффициенты экспоненциального роста волн $cf20=0.59$, $cf30=0.12$;
- коэффициент диссипации $cf40=250$.

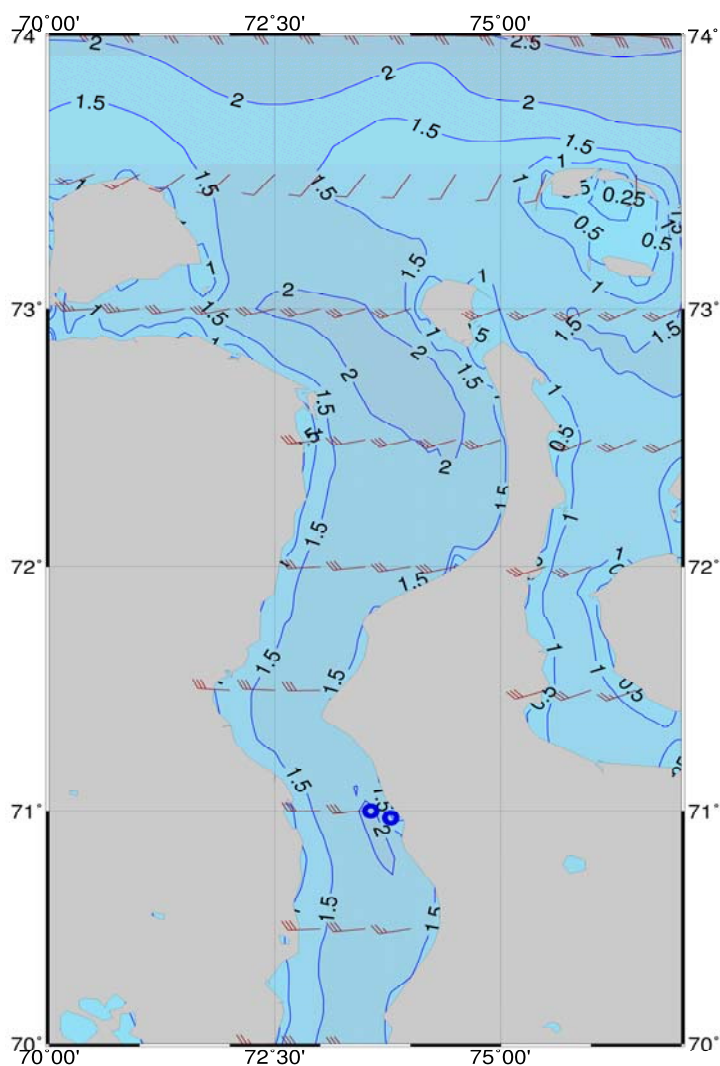


Рис. 4. Пример расчета волнения на 15 часов 31 июля 2017 г. Синие изолинии – значительные высоты волн (H_s), красные «перья» – модуль и направление ветра.

Fig. 4. An example of calculating of wave heights at 3 pm on July 31, 2017. Blue contours – significant wave heights (H_s), red “feathers” - module and wind direction.

Для такой мелкомасштабной акватории доступные в реанализе ERA5 данные о сплоченности льда с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, являются недостаточно подробными и сильно искажают результат вычислений. Поскольку периоды, в которые проводились измерения, являются практически безледными для акватории Обской губы, то сплоченность льда не принималась в расчет, и параметр AICE не был учтен.

2. Сопоставление численных данных и данных наблюдений

Графическое представление сопоставления временных рядов результатов измерений и численного моделирования представлено на рис. 5–7.

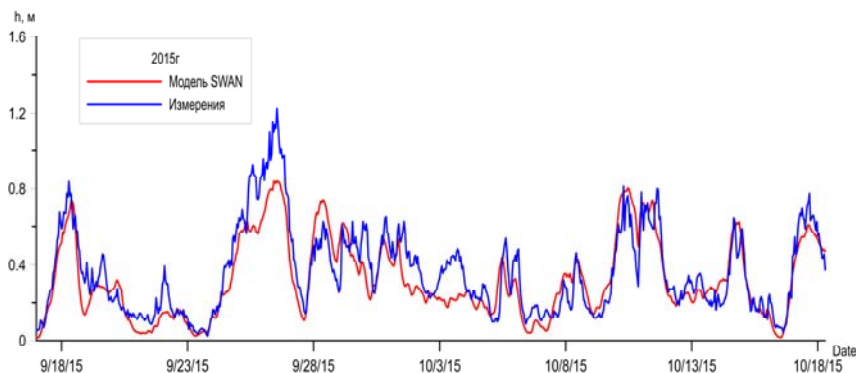


Рис. 5. Сопоставление расчетных временных рядов и данных измерений за 2015 г. в точке 71° с.ш., 73.56° в.д. (h – средняя высота волны, Date – дата измерения в формате месяц/день/год).

Fig. 5. Comparison of calculated time series and measurement data for 2015 at 71° N, 73.56° E (h – average wave height, Date – measurement date in the format month/day/year).

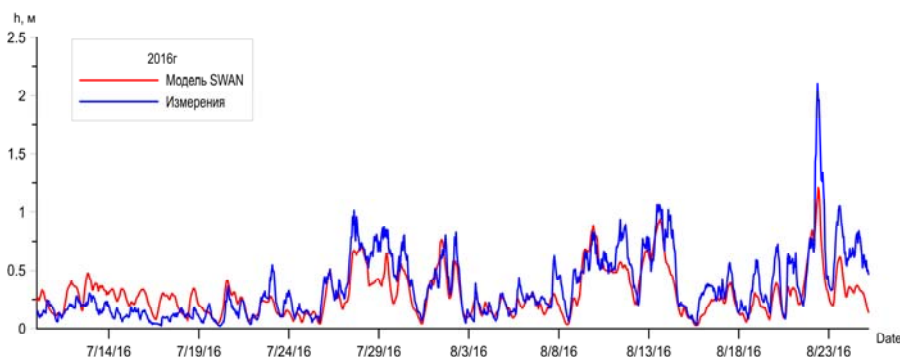


Рис. 6. Сопоставление расчетных временных рядов и данных измерений за 2016 г. в точке 71° с.ш., 73.56° в.д. (h – средняя высота волны, Date – дата измерения в формате месяц/день/год).

Fig. 6. Comparison of calculated time series and measurement data for 2016 at 71° N, 73.56° E (h – average wave height, Date – measurement date in the format month/day/year).

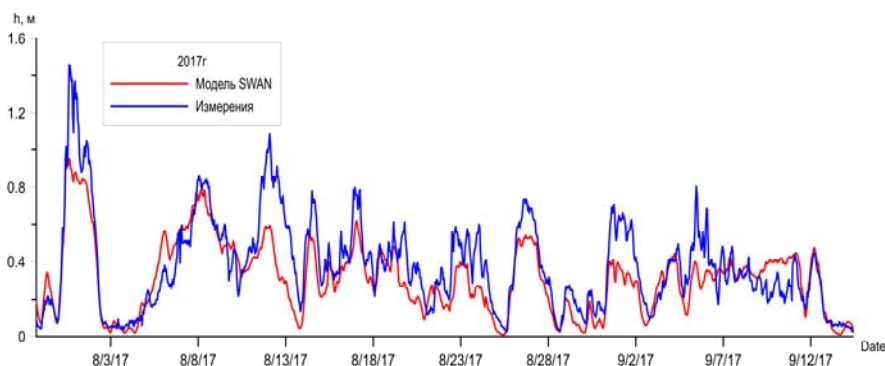


Рис. 7. Сопоставление расчетных временных рядов и данных измерений за 2017 г. в точке 71° с. ш., 73.56° в. д. (h – средняя высота волн, Date – дата измерения в формате месяц/день/год).

Fig. 7. Comparison of calculated time series and measurement data for 2017/ at 71° N, 73.56° E (h – average wave height, Date – measurement date in the format month/day/year).

При верификации модели SWAN по данным инструментальных наблюдений рассматривались следующие статистические параметры:

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_1^n (H_{1,i} - H_{2,i})}{n}; \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2}{n}};$$

$$\text{SI} = \sqrt{\frac{\sum_1^n [(H_{1,i} - \overline{H_1}) - (H_{2,i} - \overline{H_2})]^2}{\sum_1^n H_{2,i}^2}};$$

$$R = \frac{\sum_1^n (H_{1,i} - \overline{H_1})(H_{2,i} - \overline{H_2})}{\sqrt{\sum_1^n (H_{1,i} - \overline{H_1})^2 \sum_1^n (H_{2,i} - \overline{H_2})^2}},$$

где BIAS – систематическая ошибка; RMSE – среднеквадратическая ошибка; SI – индекс рассеяния; R – коэффициент корреляции; H_1 , $\overline{H_1}$ – высота средних волн и среднее значение средних волн по расчетным данным модели; H_2 , $\overline{H_2}$ – высота средних волн и среднее значение средних волн по данным наблюдений.

Следуя работе [12] добавим в рассмотрение скорректированную среднеквадратическую ошибку

$$\text{RMSEc} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2}{\sum_1^n H_{1,i} H_{2,i}}}.$$

В [14] показано, что во многих случаях скорректированное среднеквадратическое отклонение обеспечивает более достоверную информацию о точности результатов численных моделей, поскольку этот параметр

убывает при стремлении систематической ошибки (BIAS) к нулю, и возрастает при увеличении модуля систематической ошибки.

В таблице представлены описанные выше статистические параметры сравнения результатов расчетов и инструментальных наблюдений за 2015, 2016 и 2017 годы.

Таблица. Статистические параметры сравнения расчетных средних высот волн с данными измерений

Table. Statistical parameters for comparing calculated average wave heights with measurement data

Год	R	BIAS	RMSE	SI	RMSEc
2015	0.88	-0.04	0.11	0.25	0.28
2016	0.82	-0.06	0.17	0.36	0.43
2017	0.84	-0.07	0.15	0.29	0.36
Среднее	0.85	-0.05	0.15	0.30	0.36

Заключение

Результаты сопоставления данных измерений и данных расчета ветрового волнения моделью SWAN показывают, что модельные данные хорошо согласуются с наблюдениями. Следует отметить высокий коэффициент корреляции (0,85) и низкое значение среднеквадратической отклонения (0,15). Полученные оценки соответствуют нормативам оправдываемости по Наставлению [7]. Качество модельных расчетов очень сильно зависит от точности батиметрии и разрешения входных данных о характеристиках ветра и льда. Таким образом, при доступности достаточно подробной карты льда и качественных данных о ветре, возможно увеличение точности модельных расчетов. Так, для получения полей ветра более высокого разрешения целесообразно использовать региональную ветровую модель, калиброванную по доступным данным метеостанций.

Итогом верификации является заключение о пригодности модели SWAN с указанными параметрами для расчета волнения в акватории Обской губы и о целесообразности использования этой модели на данной акватории.

Список литературы

1. Давидан И.Н., Лавренов И.В., Пасечник Т.А. и др. Математическая модель и метод оперативных расчетов ветрового волнения на морях СССР // Метеорология и гидрология. 1988. № 11. С. 81-90.
2. Дымов В.И., Пасечник Т.А., Лавренов И.В., Давидан И.Н., Абузяров З.К. Сопоставление результатов расчетов современных моделей ветрового волнения с данными натурных измерений // Метеорология и гидрология. 2004. №7. С. 87-94.

3. Давидан И.Н., Давидан Г.И., Дымов В.И., Пасечник Т.А. Модифицированная версия спектрально-параметрической модели ветрового волнения и результаты ее верификации // Известия РГО. 2010. Т. 142. Вып. 2. С. 31-39.
4. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 500 с.
5. Нестеров Е.С., Абузаров З.К., Григорьева Г.А., Давидан И.Н., Дымов В.И., Пасечник Т.А. Оценка точности расчета смешанного волнения в океане по современным численным моделям // Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С. 44-52.
6. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / Под ред. Е.С. Нестерова. М., 2013. 295 с. Раздел 7.7. Дымов В.И. Спектрально-параметрическая модель AARI-PD2 (глобальная версия). С. 129-138. Раздел 8.5. Особенности режима ветрового волнения в арктических морях. С. 195-197.
7. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. 202 с.
8. Hendrik L. Tolman. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18, 1999. 110 p.
9. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Tech. Note 222, 2002. 133 p.
10. Tolman H.L. Development of a multi-grid version of WAVEWATCH III, NOAA/NWS/NCEP/EMC/MMAB Tech. Note 256, 2007.
11. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/EMC/MMAB Tech. Note 277, 2009.
12. The WAM-model- a third generation ocean wave prediction model // J. Phys. Oceanogr., 1988. Vol. 12. P. 1775-1810
13. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. Dynamics and Modeling of Ocean Waves. Cambridge: University Press, 1994. 532 p.
14. Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. Problems in RMSE-based wave model validations // Ocean Modeling. 2013. Vol. 72, no. 1. P. 53-58.

References

1. Davidan I.N., Lavrenov I.V., Pasechnik T.A. et al. Matematicheskaya model' i metod operativnyh raschetov vetrovogo volneniya na moryah SSSR. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1988, no. 11, pp. 81-90 [in Russ.].
2. Dymov V.I., Pasechnik T.A., Lavrenov I.V., Davydan I.N., Abuzyarov Z.K. Comparison of Modern Wind-Wave Model Results with Field Measurements. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2004, no. 7, pp. 67-73.
3. Davidan I.N., Davidan G.I., Dymov V.I., Pasechnik T.A. Modificirovannaya versiya spektral'no-parametricheskoy modeli vetrovogo volneniya i rezul'taty ee verifikacii. *Izvestiya RGO*, 2010, vol. 142, no. 2, pp. 31-39 [in Russ.].
4. Lavrenov I.V. Matematicheskoe modelirovanie vetrovogo volneniya v prostranstvenno-neodnorodnom okeane. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1998, 500 p. [in Russ.].
5. Nesterov E.S., Abuzyarov Z.K., Grigor'eva G.A. et al. Estimating the computation accuracy of mixed waves in the ocean on the basis of present-day numerical models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 10, pp. 669-676. DOI: 10.3103/S1068373911100049.
6. Rezhim, diagnoz i prognoz vetrovogo volneniya v okeanah i moryah / Pod red. E.S. Nesterova. M., 2013. 295 s. Razdel 7.7. Dymov V.I. Spektral'no-parametricheskaya model' AARI-PD2 (global'naya versiya). pp. 129-138. Razdel 8.5. Osobennosti rezhima vetrovogo volneniya v arkticheskikh moryah. pp. 195-197 [in Russ.].
7. RD 52.27.759-2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CHast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. Moscow: TRIADA LTD publ., 2011, 202 p.
8. Hendrik L. Tolman. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18, 1999, 110 p.
9. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Tech. Note 222, 2002, 133 p.

10. Tolman H.L. Development of a multi-grid version of WAVEWATCH III, NOAA/NWS/NCEP/EMC/MMAB Tech. Note 256, 2007.
11. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/EMC/MMAB Tech. Note 277, 2009.
12. The WAM-model- a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 1988, vol. 12, pp. 1775-1810.
13. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. Dynamics and Modeling of Ocean Waves. Cambridge: University Press, 1994, 532 p.
14. Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. Problems in RMSE-based wave model validations. *Ocean Modeling*, 2013, vol. 72, no. 1, pp. 53-58.

Поступила в редакцию 18.03.2020 г.

Received by the editor 18.03.2020.

УДК 551.589+556.535

Метеорологические условия формирования сильного наводнения в бассейне реки Амур в 2019 году

***Л.Н. Василевская¹, И.А. Лисина¹, Д.Н. Василевский²,
С.В. Агеева³, Е.Н. Подвербная³***

*¹ ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
г. Владивосток, Россия;*

² Дальневосточный филиал ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Владивосток, Россия;

*³ ФГБУ «Дальневосточное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», г. Хабаровск, Россия
lubavass@mail.ru*

В работе проанализированы атмосферные процессы, ставшие причиной сильнейшего наводнения в нижней части бассейна Амура в августе-сентябре 2019 г. Уровень воды, соответствующий категории опасного явления у г. Хабаровска и г. Комсомольска-на-Амуре, продержался 18 и 38 дней соответственно.

По материалам срочных гидрологических и метеорологических наблюдений и открытым данным реанализа исследовались особенности развития циркуляции и погодные процессы над бассейном Амура и над акваторией прилегающих окраинных морей. Привлекалась региональная типизация, разработанная дальневосточными учеными. Показано, что летний муссон был хорошо выражен в течение всего изучаемого периода 2019 г. над равнинными участками нижнего течения Амура, что повлияло на увлажнение данной территории. Экстремальные осадки четырех коротких периодов в августе-сентябре, вызванные тремя тайфунами, сформировали катастрофический паводок в конце лета.

Ключевые слова: максимальные уровни воды, наводнение, река Амур, катастрофическое наводнение 2019 года, дальневосточная депрессия, охотский антициклон, тайфуны

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-90-108>

Meteorological conditions for the formation of severe flooding in the Amur River basin in 2019

***L.N. Vasilevskaya¹, I.A. Lisina¹, D.N. Vasilevsky²,
S.V. Ageeva³, E.N. Podverbnaya³***

¹ FGAOU VO "Far Eastern Federal University", Vladivostok, Russia;

² Far Eastern Branch of FSBI Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Vladivostok, Russia;

*³ FSBI "Far Eastern Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring", Khabarovsk, Russia
lubavass@mail.ru*

The heaviest flooding covered the lower part of the Amur basin in August – September 2019 is considered. The water level was up to the hazard category in the city of Khabarovsk and in the city of Komsomolsk-on-Amur and lasted for 18 and 38 days, respectively.

The research of weather and circulation process, that caused the dangerous nature of this flood, was carried out on the basis of routine hydrological observations of the Far Eastern Department of Hydrometeorology (Khabarovsk); according to meteorological observations of a number of stations of the Jewish AO, Khabarovsk region and China; open materials of reanalysis NCEP/NCAR, Japan Meteorological Agency, Far Eastern Research Hydrometeorological Institute.

The analysis of the atmospheric processes' development over the Amur basin and over the water area of adjacent marginal seas was made on these materials. The regional typing developed by Far Eastern scientists was involved in the research. It is shown that the summer monsoon was well expressed during the entire study period of 2019 over the plains of the lower reaches of the Amur river, which affected the watering of this land area. Extreme precipitation in four short periods in August-September caused by three typhoons formed a catastrophic flood at the end of the summer period.

Keywords: maximum water levels, flood, Amur River, catastrophic flood 2019, Far Eastern depression, Okhotsk anticyclone, typhoons

Введение

В 2019 году на реке Амур состоялось очередное наводнение, одно из крупнейших за всю историю гидрологических наблюдений с 1896 года. Наводнение охватило нижнюю часть бассейна Амура. Уровень воды категории опасного явления (ОЯ) у г. Хабаровска был достигнут 22 августа и наблюдался в течение 18 дней (до 8 сентября), у Комсомольска-на-Амуре уровень ОЯ был превышен 26 августа и продержался 38 дней (до 2 октября).

Правильное понимание механизма наводнений, необходимое для разработки методов их прогнозирования, невозможно без изучения развития атмосферных процессов в течение паводкового периода. Исходя из этого, была поставлена задача исследования погодных и циркуляционных процессов, обусловивших катастрофическое наводнение в бассейне Амура. Для достижения этой цели проводился анализ гидрографов стока и пространственно-временного распределения атмосферных осадков, анализировались синоптические процессы, изучалось состояние дальневосточной депрессии и охотского антициклона, рассматривалось развитие тропических циклонов, вызвавших выпадение обильных осадков.

Материалы и методы

Оценка уровней воды производилась по материалам срочных гидрологических наблюдений, опубликованным в графическом виде на официальном сайте ФГБУ «Дальневосточное УГМС» [15]. На этих же графиках представлены средние многолетние нормы уровней воды для каждого дня. Для исследования был выбран период наблюдений с 31 мая по 31 октября 2019 г. на четырех гидрологических станциях: Хабаровск, Елабуга, Троицкое и Комсомольск-на-Амуре (рис. 1).

Осадки оценивались по ежедневным данным за период сентябрь-октябрь 2018 г. и с мая по сентябрь 2019 г. на метеорологических станциях Российской Федерации, расположенных в среднем и нижнем течении

Амура (рис. 1) [15] и станциях КНР (Харбин, Чанчунь, Нейцзянг, Цзиси) [11]. Станции, расположенные на китайской стороне, находятся в бассейне Сунгари, самого крупного по водности притока Амура, вносящего значительный вклад в сток Нижнего Амура. Выбор шести российских метеостанций (три из которых – Комсомольск-на-Амуре, Хабаровск и Елабуга – совмещены со станциями гидрологическими) обусловлен тем, что, по исследованиям авторов [1], они являются показательными, отражающими режим отдельных районов с синхронными колебаниями экстремальных осадков в июле–августе.



Рис.1. Схема расположения гидрологических и метеорологических станций.
Fig. 1. Locations of hydrological and meteorological stations.

Вследствие сложного рельефа и неоднородности синоптических процессов на территории бассейна Амура распределение осадков неоднородно и носит «пятнистый» характер [9], поэтому для более полного представления о пространственном распределении осадков привлекались материалы реанализа NCEP/NCAR, представленные на сайте NOAA [10].

Циркуляционные условия у поверхности Земли и в средней тропосфере оценивались по ежедневным картам барической топографии (четыре раза в сутки) Японского метеоагентства [22].

Анализ движения тайфунов выполнялся с использованием информации, представленной на сайте ДВНИГМИ [4] и по материалам Японского метеоагентства [22].

Исследование, проведенное в настоящей работе, основывалось на достижениях дальневосточной гидрометеорологической школы. Большое количество публикаций, посвященных циклонической деятельности

в бассейне Амура и процессам, вызывающим катастрофические наводнения, принадлежит дальневосточным ученым и специалистам-гидрометеорологам [7, 12–14, 16, 19, 20]. Особое внимание в этих работах уделялось анализу региональных центров действия атмосферы, к которым относятся охотский антициклон и дальневосточная депрессия. Взаимодействие этих центров определяет первую стадию развития летней муссонной циркуляции на юге Дальнего Востока; а в развитии второй стадии основную роль играет гавайский антициклон и южно-азиатская депрессия [3].

Охотский антициклон препятствует выходу циклонических образований с бассейна Амура к востоку, вследствие чего здесь в летнее время существует квазипостоянная депрессия, обуславливающая пасмурную погоду с осадками. В периоды отсутствия области высокого давления над Охотским морем континентальные циклоны имеют свободный выход к востоку, и характер погоды дальневосточных районов резко меняется [14]. Поле высокого давления над Охотским морем формируется под воздействием одного из трех типов синоптических процессов:

I тип – прохождение через Охотское море западных антициклонов или их гребней;

II тип – стабилизация в этом районе ядер и отрогов высокого давления, поступающих с северо-запада и северо-востока;

III тип – формирование над Охотским морем новых антициклонов, в основном вследствие арктических вторжений [7].

Согласно [16], охотский антициклон определяет развитие летней дальневосточной депрессии, которая располагается над Приамурьем в теплый период: здесь возникает 35 % всех циклонов, формирующих депрессию, а остальные циклоны перемещаются из районов Восточной Сибири, Прибайкалья, Восточной Монголии и Северного Китая. Основной причиной возникновения южно-байкальских циклонов является орографическая деформация глубоких высотных ложбин, формирующихся вследствие макромасштабных процессов в тропосфере [13, 14].

Краткая характеристика района исследований

На основании особенностей строения речной долины реки Амур выделяют три основных ее участка: Верхний, Средний и Нижний Амур. Режим атмосферных осадков над этой территорией определяется условиями муссонной циркуляции, циклонической деятельностью и характером рельефа. Обычно сезон дождей начинается с конца июня и продолжается до середины сентября, максимальное количество осадков выпадает в июле или августе.

Основным типом питания рек является дождевое, его доля составляет 60–80 % общего годового стока. На снеговое питание приходится 10–20 %, на подземное – 10–20 %. Для Амура характерен единый паводковый период, продолжающийся в течение 5–6 месяцев. Количество дождевых паводков в это время изменяется от года к году в зависимости от условий проникновения муссонов на территорию бассейна. Дожди

обложного характера, охватывающие обширные площади, при условии значительной предварительной увлажненности почво-грунтов бассейна, вызывают мощные паводки и наводнения. На Нижнем Амуре пики паводков сливаются в один продолжительный период высокого стояния воды: малые наводнения наблюдаются с апреля по октябрь; основная часть больших, выдающихся и катастрофических наводнений отмечается в августе-сентябре. Максимум катастрофических наводнений на Нижнем Амуре приходится на сентябрь.

Обычные наводнения, при которых затапливаются низкие места поймы, наблюдаются почти ежегодно. Большие наводнения наблюдаются один раз в 3–6 лет. Повторяемость катастрофических наводнений – один раз в 6–10 лет [21].

Высокие уровни воды связаны не только с обильными осадками и предшествующей увлажненностью бассейна, но и с изменениями пропускной способности русла. Основной причиной таких деформаций в нижнем течении Амура являются естественные и закономерные изменения морфологического строения русла реки, обусловленные транзитным движением донных руслоформирующих наносов. Вертикальные циклические деформации русла реки имеют амплитуду от 2 до 10 м, что при глубинах в реке 10–20 м оказывает определяющее влияние на изменения пропускной способности русла реки на участках с русловой многорукавностью [8].

После ввода в строй Зейского и Бурейского водохранилищ, а также семи водохранилищ, построенных в бассейне р. Сунгари, внутригодовое распределение стока Среднего и Нижнего Амура существенно изменилось за счет сглаживания уровня режима Амура (зимний сток увеличивается, а пики максимального стока половодий и паводков срезаются) [6, 21].

Результаты и их обсуждение

Из-за умеренных снегозапасов и незначительных весенних осадков максимальные уровни снегодождевых паводков 2019 г. на реке Амур были ниже средних многолетних значений. К началу июня водность повысилась за счет прохождения дождевых паводков (рис. 2а) с превышением средних многолетних значений этого периода на всех створах от Благовещенска до Комсомольска-на-Амуре. Уровни на некоторых гидрологических постах достигали отметки уровня выхода воды на пойму (Троицкое, Комсомольск-на-Амуре). В Хабаровске, Елабуге и Ленинске эта отметка была превышена. Фаза летней межени, которая на Амуре наблюдается в июне – первой половине июля, практически не была выражена, а начавшиеся дожди формировали сток с минимальными потерями.

На формирование паводка в створе Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре 2019 г. влияние оказали предшествующие гидрометеорологические условия. По причине малоснежной зимы сезона 2018-19 гг. в предпаводочный период на Амуре и его притоках преобладала пониженная

водность. Однако после выпадения интенсивных осадков именно над территорией Нижнего Амура в июле (на 50-75% выше месячной нормы) водность реки значительно повысилась. Последующие осадки августа (в 2–2,5 раза выше месячной нормы) привели к появлению катастрофического паводка в г. Комсомольске-на-Амуре. Озерные притоки нижнего течения Амура, аккумулирующие максимальные объемы стока, и сами озера были максимально заполнены и не смогли принять паводковые воды. По спутниковым снимкам [5] было выявлено, что в 2019 году, при меньших уровнях, площади затопления этих участков на 1/3 больше, чем во время паводка 2013 года.

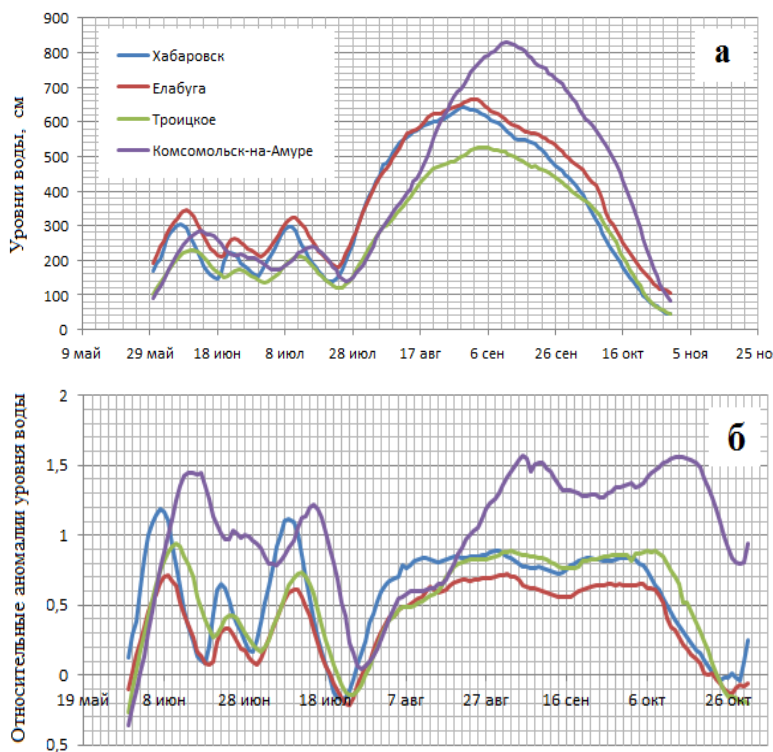


Рис. 2. Совмещенные уровни воды за период летне-осенних паводков 2019 г. (а) и относительные аномалии уровня воды (б).

Fig. 2. Combined water levels for the summer-autumn floods of 2019 (а) and relative anomalies of water level (б).

Продолжительность стояния высоких уровней (с превышением неблагоприятных отметок) составила в районе Хабаровска (6 августа – 28 сентября) и Комсомольска-на-Амуре (17 августа – 15 октября) полтора-два месяца. Вода на пойме продержалась еще более продолжительное время, соответственно, с 20 июля по 10 октября и с 7 августа по 20 октября. Пик паводка у Комсомольска-на-Амуре прошел 11–12 сентября

с отметкой 829 см. Паводок категории опасного явления на Амуре закончился 15 октября.

Сравнительная характеристика хода аномалий уровня воды относительно его среднего многолетнего ежедневного значения (рис. 2б) выявила ее отрицательные характеристики только для отдельных дней. По створам на станциях Хабаровск, Елабуга, Троицкое это был период последней декады июля и октября. Что касается хода водности по данным станции Комсомольск-на-Амуре, то уровень ниже нормативного значения встречался только в конце мая, причем для данного створа характерны наиболее высокие положительные отклонения за время прохождения паводка.

Причиной движения волны паводка по Нижнему Амуре является определенный характер выпадения осадков. Судя по данным табл. 1, с мая по август число дней с осадками в среднем по территории превышало 15 дней в месяц, особенно часто они наблюдались в августе (Екатерино-Никольское, Вяземский, Хабаровск – 21 день, Елабуга – 22 дня, Цзиси – 24 дня). Суммы осадков, выпавших как на российской, так и на китайской территории бассейна за август 2019 г., составляли 150–404 мм, что превысило норму до 2 – 2,5 раз.

Таблица 1. Количество и число дней с атмосферными осадками
Table 1. Precipitation amount (mm) and number of days with precipitation

Станция	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	$\frac{R, \text{ мм}}{\%}$ от R_m	п, дни	$\frac{R, \text{ мм}}{\%}$ от R_m	п, дни	$\frac{R, \text{ мм}}{\%}$ от R_m	п, дни	$\frac{R, \text{ мм}}{\%}$ от R_m	п, дни	$\frac{R, \text{ мм}}{\%}$ от R_m	п, дни
Екатерино-Никольское	$\frac{152}{227}$	16	$\frac{193}{187}$	14	$\frac{161}{111}$	14	$\frac{249}{173}$	21	$\frac{126}{133}$	5
Смидовичи	$\frac{177}{268}$	19	$\frac{116}{129}$	13	$\frac{104}{65}$	14	$\frac{404}{297}$	16	$\frac{192}{159}$	9
Вяземский	$\frac{81}{123}$	15	$\frac{110}{116}$	13	$\frac{134}{109}$	20	$\frac{314}{238}$	21	$\frac{49}{52}$	8
Хабаровск	$\frac{131}{215}$	19	$\frac{106}{132}$	16	$\frac{202}{176}$	17	$\frac{332}{270}$	21	$\frac{90}{101}$	12
Елабуга	$\frac{114}{193}$	15	$\frac{77}{95}$	13	$\frac{103}{85}$	13	$\frac{260}{206}$	22	$\frac{66}{75}$	12
Комсомольск-на-Амуре	$\frac{120}{235}$	20	$\frac{43}{60}$	13	$\frac{150}{158}$	13	$\frac{220}{222}$	16	$\frac{198}{215}$	11
Харбин	62	8	19	13	169	15	173	17	69	7
Нейцзянг	40	9	100	14	347	24	151	17	11	7
Цзиси	48	8	120	12	116	14	264	24	54	7
Чанчунь	81	12	205	14	146	15	160	19	31	4

Примечание. R – количество атмосферных осадков; R_m – среднее многолетнее значение осадков; п – число дней с осадками.

Следует обратить внимание на продолжительность периодов непрерывного выпадения осадков, которая может способствовать возникновению стремительного паводка. Так, согласно исследованиям временной изменчивости случайного процесса выпадения осадков в бассейне Амура [1] следует, что продолжительность периода выпадения осадков, приводящих к экстремальному паводку, должна быть не менее 7–10 суток. Авторы указывают на то, что даже интенсивные осадки меньшей продолжительности не приводят к опасности наводнения на больших реках.

Анализ периодов непрерывной продолжительности выпадения осадков, независимо от их суммарного количества, показал, что:

- в мае в среднем течении Амура наряду с 4-дневными отмечались 7 и 8-дневные, а в нижнем течении – 6 и 10-дневные периоды;

- в июне процессы выпадения осадков были самыми непродолжительными – отмечались 3–4-дневные периоды;

- в июле в среднем течении Амура картина была аналогична июньской, в верхней части Нижнего Амура наблюдалось семь 4-дневных периодов (МС Вяземский), а в нижнем течении продолжительность периодов с осадками составила 6 и 9 дней;

- в августе период с непрерывным выпадением осадков увеличился до 7 и 10 дней; в сентябре он сократился до 2 дней.

Исходя из внутрисезонного распределения осадков (табл. 1), можно заключить, что формирование значительной увлажненности бассейна происходило в июле – августе. В июле основное количество осадков выпало в средней части Амура (рис. 3).

В августе очаги максимального выпадения осадков переместились в область нижнего течения Амура (рис. 3); в увеличение его водности начинает вносить весомый вклад сток реки Сунгари (до 40–50% от всего объема стока Нижнего Амура), что сразу сказалось на стремительном повышении уровня в районе Хабаровска. Экстремальные осадки (рис. 3), локально выпавшие в сентябре в средней части Нижнего Амура и наложившиеся на волну паводка со стороны Хабаровска, сыграли решающую роль в формировании паводка катастрофической величины в Комсомольске-на-Амуре.

Детальное исследование циркуляционных процессов, обусловивших формирование паводка 2019 года, проводилось по ежедневным приземным картам с одновременной оценкой состояния региональных центров действия атмосферы. В июне (1-я стадия летнего муссона) циклоническая деятельность над бассейном Амура преобладала в течение 17 дней; давление в центре неглубоких циклонов понижалось до 990–1000 гПа. Среднемесячное поле приземного давления над бассейном Амура представляло собой ложбину южно-азиатской депрессии. Наименьшее влияние циклоны оказывали на верхнее и нижнее течения Амура (всего 9 дней), более продолжительной циклоническая деятельность была в среднем течении и в районе Хабаровска (15 дней).

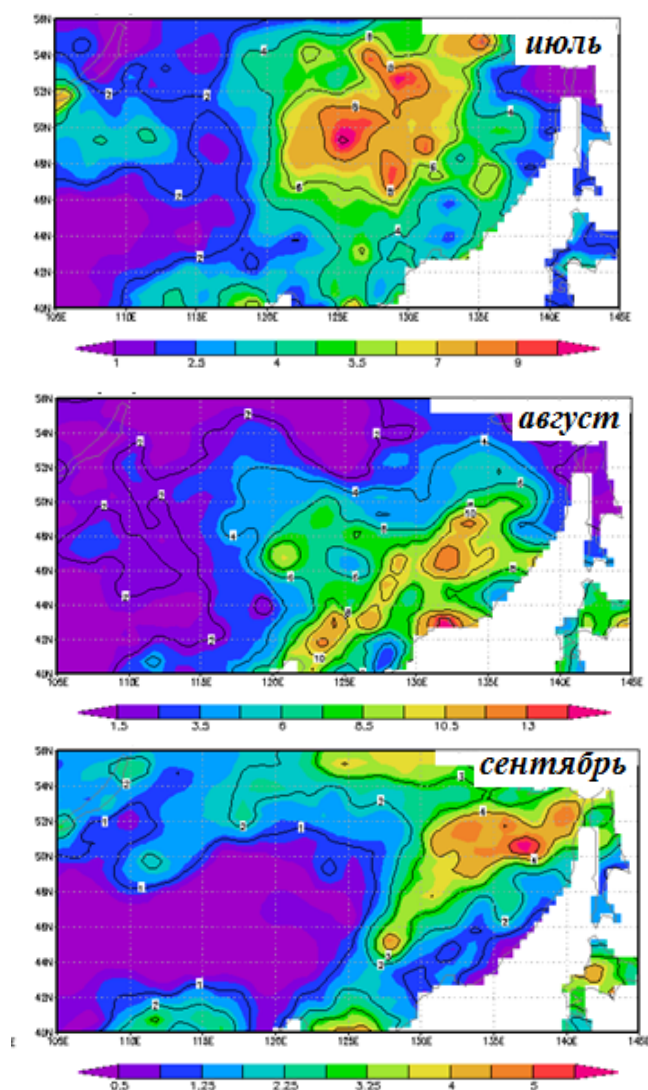


Рис. 3. Среднесуточное значение атмосферных осадков (мм) в июле, августе и сентябре 2019 г. по данным реанализа NCEP/NCAR.
Fig. 3. The average daily rainfall (mm) in July, August and September 2019, according to the NCEP / NCAR reanalysis.

Над Охотским морем в течение 14 дней преобладала антициклоническая циркуляция (давление в центре антициклонов достигало 1018–1020 гПа), из них 5 дней антициклоны возникали непосредственно над акваторией моря (III тип процессов), а в остальное время гребень был направлен преимущественно с юго-востока, востока, из области гавайского антициклона (I тип процессов). Аномально пониженный

температурный фон в нижней тропосфере (AT_{850}) и наличие отрицательных аномалий температуры воды ($2-3^{\circ}\text{C}$) в западной части моря способствовали развитию мощного антициклона над Охотским морем [4]. Антициклон (8–12 июня и 14–17 июня) распространялся своим устойчивым гребнем на континент, в бассейн Амура и даже на Корейский полуостров, а с 1 по 7 июня и с 25 по 30 июня – не препятствовал смещению на восток глубоких континентальных циклонов.

Во время 2-й стадии дальневосточного муссона (июль – август), влагосодержание воздушных масс, поступающих в виде мощного их выноса с океана на континент, довольно велико ($35-40 \text{ кг/м}^2$ в морском тропическом воздухе по сравнению с 20 кг/м^2 в воздушной массе умеренных широт).

В июле 2019 года над бассейном Амура в течение 19 дней преобладали циклоны континентальные, смещающиеся с запада, или же местные (давление в центрах циклонов колебалось от 988 до 1000 гПа). Зачастую эти циклоны оставались малоподвижными над бассейном Амура. Весь период (19 дней) циклоны располагались именно над нижним течением Амура. Смещению циклонов на дальневосточные моря препятствовал хорошо развитый региональный охотский антициклон, который прочно обосновался над акваторией Охотского моря (26 дней). Лишь в отдельные дни (5 дней) на морскую поверхность выходили континентальные циклоны (23, 27, 28 и 30–31 июля). Отметим, что стационарирование охотского антициклона было обусловлено синоптическими процессами I типа (13 дней), II типа (7 дней) и III типа (6 дней). Значительные отрицательные аномалии температуры поверхности Охотского моря способствовали поддержанию антициклональной циркуляции в течение июля 2019 года.

В августе 2019 года была хорошо развита дальневосточная депрессия: циклоническая циркуляция над нижним течением Амура преобладала в течение 20 дней (давление в центре циклонов составляло 992–1000 гПа). Антициклоническое поле над Охотским морем, поддерживаемое в основном синоптическими процессами II типа (11 дней) и III типа (8 дней), наблюдалось в течение 23 дней. Хорошо развитый охотский антициклон выступал в роли блокинга, не позволяя континентальным циклонам выходить на морскую поверхность; он ослабевал лишь в течение непродолжительного времени (3–5 дней).

Исследования дальневосточных метеорологов [14] позволили установить, что средняя непрерывная продолжительность преобладания антициклонической циркуляции над Охотским морем с мая по сентябрь составляет 2,6 суток. В исследуемый же летний сезон 2019 года наблюдалась следующая продолжительность эпизодов с антициклонической циркуляцией: в июне – 6 и 5 дней; в июле – 24 и 3 дня; в августе – 5 и 15 дней.

Согласно [10, 19], глубокие циклоны не во всех случаях вызывают сильные осадки. Для обильных дождей необходимы благоприятные

условия выноса тропических воздушных масс воздуха с юга. Сильные дожди над бассейном Амура чаще всего определяются тайфунами, выходящими на континентальные районы Приамурья, Хабаровского и Приморского края и акваторию Японского и Охотского морей. По результатам исследования [12] в 90 % случаев сильные дожди на юге Приамурья в июле – августе имеют тайфунное происхождение.

Весомый вклад в формирование высокого паводка 2019 г. внесли три тайфуна летне-осеннего сезона (рис. 4).

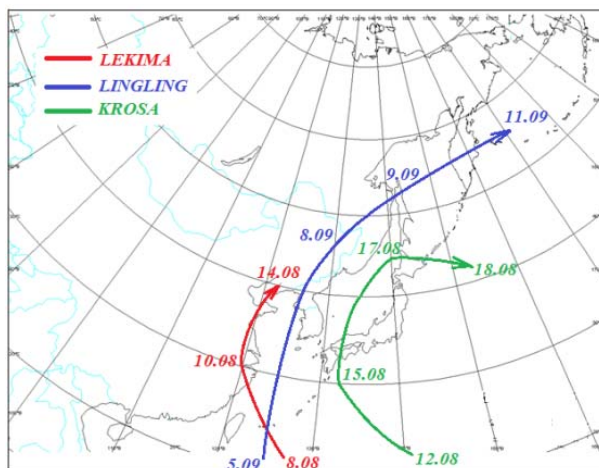


Рис. 4. Траектории движения тайфунов в августе-сентябре 2019 г., вызвавших сильные осадки в бассейне Амура.

Fig. 4. Trajectories of typhoons that caused heavy rainfall in the Amur basin in August-September 2019.

Тайфун Lekima вышел 11 августа на берег полуострова Шаньдун, принеся с собой ливни и сильный порывистый ветер, через сутки он ослабел и заполнился до тропической депрессии с давлением в центре 992 гПа, медленно смещаясь на север. Над северо-западной частью Желтого моря тропическая депрессия повернула на северо-восток и утром 14 августа вышла на континент. Вслед за Китаем под влияние тайфуна Lekima попал российский Дальний Восток. Произошедшее 11 августа объединение фронтальной зоны и Lekima привело к обострению атмосферных фронтов, которые протянулись с Китая на Хабаровский и Приморский края, Еврейскую АО [4]. По информации Дальневосточного УГМС, 14–15 августа Lekima принес сильные дожди в бассейн реки Сунгари, что вызвало формирование высоких паводков с дополнительным подъемом уровней воды на 1,0–1,5 м в районе Хабаровска. 15 и 16 августа юг Хабаровского края, Амурская область и Еврейская АО находились под воздействием самого тайфуна Lekima, обусловившего выпадение сильных дождей (рис. 5а).

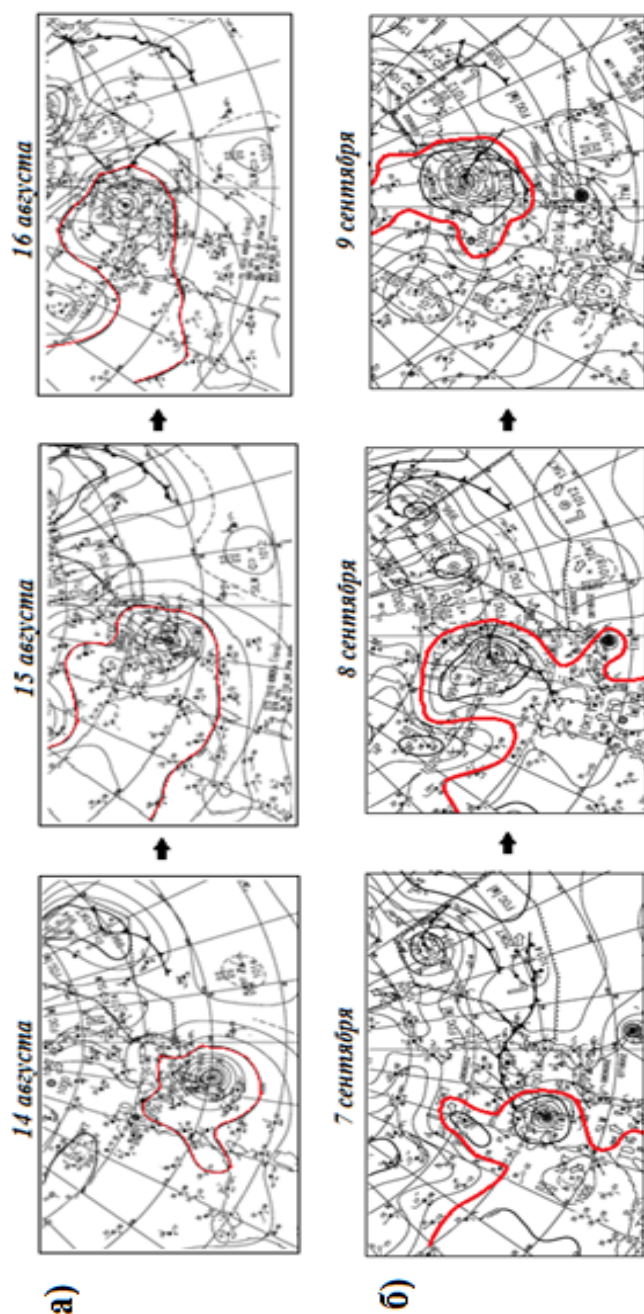


Рис. 5. Развитие синоптических процессов в бассейне Амура с выходом тайфунов: Лекима и Кроса с 14 по 16 августа 2019 г. (а); Линглинг с 7 по 9 сентября 2019 г. (б) [22]. Красной линией выделена область влияния тайфунов.

Fig. 5. Development of synoptic processes in the Amur basin with the landfall of typhoons: Lekima and Krosa from August 14 to 16, 2019 (a); Lingling from September 7 to 9, 2019 (b) [22]. The red line marks the area of typhoon impact.

Тайфун Krosa, при подходе к Корейскому проливу (15 августа) (рис. 4), привел к обострению полярного фронта, который вызвал в Приморском и Хабаровском краях, Северном Китае сильные дожди. Резкое обострение контрастов температуры на полярном фронте произошло за счет вторжения холодного воздуха, связанного с распространением полярной ложбины далеко на юг, и выносом теплого воздуха с юга, обусловленного циркуляцией тайфуна. 16 и 17 августа Хабаровский край и Еврейская АО продолжали находиться под воздействием этого тайфуна.

В период воздействия двух тайфунов (с 10 по 20 августа) на всех метеорологических станциях Нижнего Амура было зафиксировано значительное количество осадков (табл. 2), доля которых составила 45–60 % от месячной суммы.

Таблица 2. Суммарное количество осадков (мм) за отдельные периоды
Table 2. The total amount of precipitation (mm) for several periods

Станция	Периоды с выпадением интенсивных осадков				
	10–20.08.19	21–23.08.19	27–31.08.19	01–10.09.19	11–20.09.19
Екатерино-Никольское	175	33	25	99	27
Смидович	185	55	126	167	25
Вяземский	185	18	82	15	34
Хабаровск	198	18	90	51	33
Елабуга	157	14	79	31	29
Комсомольск-на-Амуре	113	4,6	92	155	33

Период с 21 по 23 августа характеризуется выпадением обильных осадков, вызванных прохождением глубокого циклона (давление в центре 992 гПа), смещающегося с Забайкалья по ныряющей траектории. 21 августа в переднюю часть этого циклона втягивается тропический воздух из области тропической депрессии над Желтым морем. 22–23 августа циклон стал заполняться (до 1000 гПа), объединившись с регенерировавшей депрессией, ставшей внетропическим циклоном. Теплый влажный воздух устремился в нижнюю часть бассейна Амура с акватории Тихого океана. В конце августа (27–31.08) со стороны Китая подошла очередная депрессия; один из циклонов, который перемещался вдоль северо-западного побережья Японского моря, вызвал еще более сильные дожди на Нижнем Амуре. 5–6 сентября сильные осадки в Комсомольске-на-Амуре (около 50 мм) были связаны с фронтальными разделами.

Экс-тайфун Lingling (рис. 5б) 8–9 сентября оказал влияние на весь бассейн Нижнего Амура, вызвав сильные ливни с интенсивностью 50 мм и более за 12 часов [18]. Карта среднесуточного значения атмосферных

осадков за 5–9 сентября наглядно иллюстрирует локальное распространение их максимальных величин вдоль нижнего течения Амура (рис. 6). На Комсомольск-на-Амуре обрушилось 84 мм осадков (около месячной нормы), вклад тайфунных дождей составил около 50 % от их количества за сентябрь. Волна паводка в это время находилась всего в 200 км от города, поэтому его пик пришелся на 11–12 сентября, объединив в себе высокий транзитный сток и тайфунные осадки.

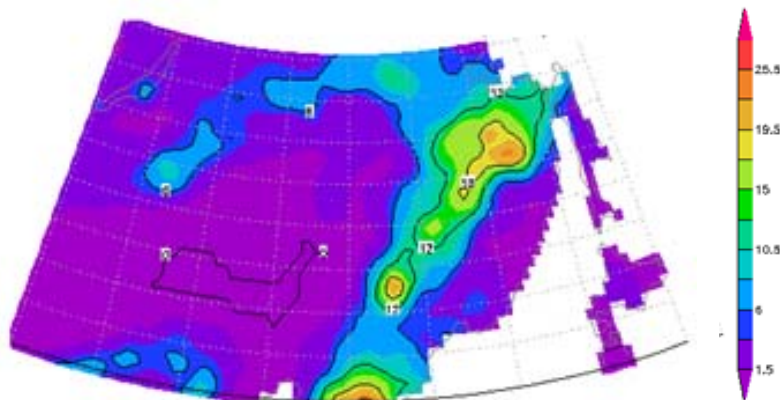


Рис. 6. Среднесуточное значение атмосферных осадков (мм) с 5 по 9 сентября 2019 г. по данным реанализа NCEP/NCAR.

Fig. 6. The daily average of precipitation (mm) from September 5 to 9, 2019, according to the NCEP/NCAR reanalysis.

Поскольку циклоническая деятельность над исследуемой территорией носит в основном фронтальный характер, то развитие и локализация циклонов определяется структурой термобарического поля. Главным звеном этой структуры является высотная фронтальная зона (ВФЗ) умеренных широт [2, 14, 19]. Циклоны у земли преимущественно развиваются под ВФЗ. Для июля – августа осевой линией, характеризующей среднее положение ВФЗ над Дальним Востоком, является изогипса 568 дкм [19]. В июле 2019 г. ВФЗ в среднем располагалась вдоль 52–58° с. ш. (изогипса 570 дкм), т. е. намного севернее обычного (рис. 7). Соответственно, полярная высотная ложбина не распространялась на юг, а чаще всего наблюдалась над нижним бассейном Амура (область ложбины была занята положительными аномалиями геопотенциала до 3–6 дкм). В августе 2019 г. ВФЗ над исследуемой областью была расположена квазизонально вдоль 53° с. ш.

Определенный интерес представляет сравнение высотных полей для июля и августа с теми, что наблюдались в эти месяцы в 2013 г., также отмеченном катастрофическим наводнением на реке Амур (рис. 7).

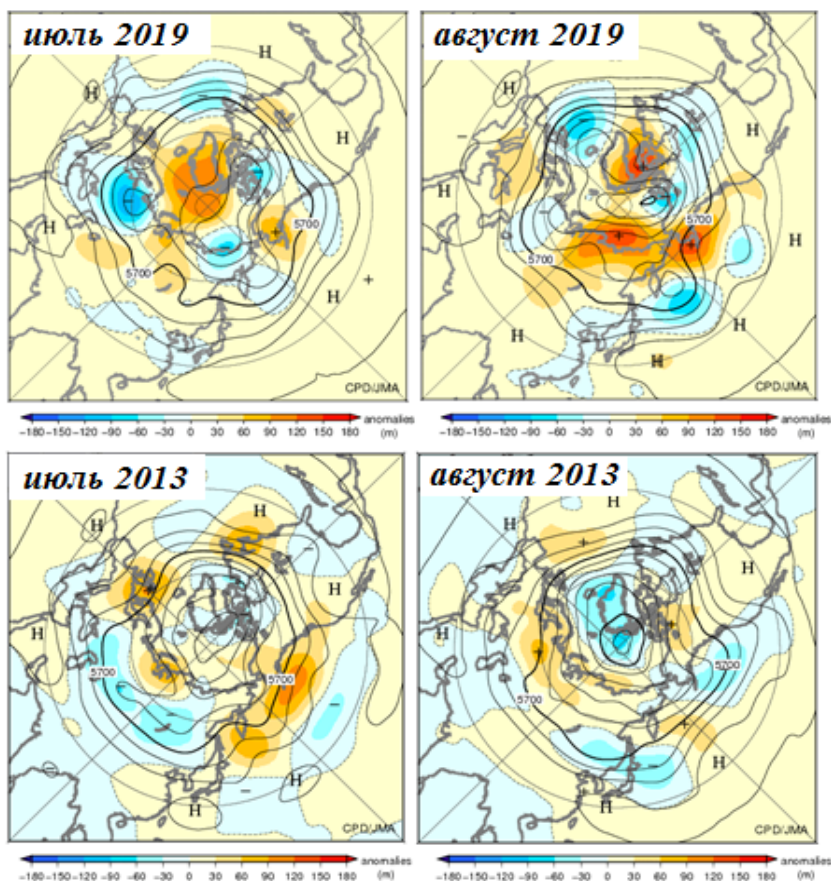


Рис. 7. Среднее поле H500 (изогипсы проведены через 6 дкм) и аномалии геопотенциала в июле-августе 2019 и 2013 гг. [22].

Fig. 7. The average field of 500 mb height (contour interval is 6 dcm) and the height anomalies in July (left) and August (right) in 2019 (top) and in 2013 (bottom) [22].

Действительно, ВФЗ умеренных широт в 2013 г., в отличие от ВФЗ в 2019 г., была расположена намного южнее, вдоль 45–48° с. ш., и была более интенсивной. Высотная полярная ложбина в 2013 г. была хорошо развита (отрицательные аномалии геопотенциальной высоты здесь составляли 3–6 дкм) и распространялась на юг, на территорию Китая. В ее тыловую часть постоянно происходили затопы холода из арктического района. Все это обусловило частое смещение в бассейн Амура глубоких, насыщенных влагой циклонов, которые, так же как в исследуемом 2019 г., блокировались областью высокого давления над северо-западом Тихого океана. Интенсивные ливневые дожди, охватившие в 2013 г. весь бассейн

Амура, как на территории Российской Федерации, так и Китая, продолжались около двух месяцев (июль – август). По данным наблюдений на метеорологических станциях Росгидромета, количество осадков в период паводка в Амурской области, Еврейской АО и Хабаровском крае достигло или даже превысило годовую норму [1, 5, 9, 10, 17].

Заключение

В теплый период 2019 г. распределение осадков над бассейном Амура было неравномерным, чаще всего очаги значительных осадков наблюдались над средним и нижним течением. Увлажнению этой части территории способствовали высокие относительно многолетней нормы суммы осадков в мае и частично – в июне. Во второй половине лета максимальные осадки выпадали преимущественно над Нижним Амуром. В отличие от 2013 г., когда осадки практически непрерывно увлажняли бассейн Амура в течение июля – августа, паводок 2019 г. на территории Нижнего Амура формировался несколькими, относительно короткими периодами (11–12 августа, 14–22 августа, 28 августа – 2 сентября, 8–10 сентября) с сильными осадками.

Одной из причин аномального увлажнения бассейна Амура явилась значительная повторяемость циклонической циркуляции над ним и антициклонической – над Охотским морем. Так, в июле – августе в течение 19–20 дней циклоны располагались именно в нижнем течении Амура, их смещение на восток блокировал хорошо развитый охотский антициклон. Продолжительность непрерывных периодов антициклонической циркуляции над Охотским морем составила в июле – 24 и 3 дня; в августе – 5 и 15 дней, что значительно превысило средний многолетний показатель. Отрицательные аномалии температуры поверхности Охотского моря (1–3 °C) обусловили стационарирование охотского антициклона в июле и образование ядер высокого давления в июне – августе.

Высотная фронтальная зона умеренных широт в июле 2019 г. располагалась вдоль 52–58° с. ш. над нижним течением Амура, намного севернее среднего многолетнего положения. Это обусловило преимущественное развитие циклонов над нижним течением Амура, в отличие от 2013 г., когда ВФЗ располагалась гораздо южнее (45–48° с. ш.).

Сильные дожди над бассейном Амура, которые окончательно сформировали катастрофический паводок в конце летнего периода, вызваны тремя тайфунами, выходящими на континентальные районы Приамурья, Хабаровского края, Приморского края и акваторию Японского и Охотского морей: Lekima (11–14 августа), Krosa (15–17 августа), Lingling (7–9 сентября). Суммы осадков были заметно превышены, местами в 2–2,5 раза по отношению к средней многолетней норме. Экстремальные осадки этих периодов отличались прежде всего локальным охватом территории и незначительной продолжительностью выпадения.

Таким образом, максимальный сток в бассейне Амура, имея сложный генезис, значительно проявился летом 2019 года в его нижнем течении вследствие сложившихся циркуляционных условий в бассейне Амура и над акваторией Охотского моря на фоне макроциркуляционных процессов.

Список литературы

1. Болгов М.В., Трубецкова М. Д., Филиппова И. А., Харламов М. А. Особенности выпадения экстремальных осадков в бассейне реки Амур летом 2013 г. // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 37-45.
2. Бортин Н.Н., Милаев В.М. Исследование многолетней динамики и схема сверхдолгосрочного прогноза наводнений на реке Амур // Водное хозяйство России. 2014. № 4. С. 45-59.
3. Василевская Л.Н., Шкаберда О.А., Ламаш Б.Е., Платонова В.А., Кукаренко Е.А. Особенности долгопериодной изменчивости температуры, осадков и сроков наступления второй стадии летнего муссона в заливе Петра Великого // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 71-82.
4. Гидрометеорологический бюллетень, 2019 – <http://www.ferhri.ru/napravleniya-rabot/proekty/2017-07-28-00-41-16/gidrometeorologicheskij-byulleten-2019g.html>
5. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Том 41, № 2. С. 111-122.
6. Иванов В.А. Особенности формирования уровня режима рек Амур и Зея у г. Благовещенска при прохождении паводков // Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ЭСПэХа, 2015. 168 с. С. 91-101.
7. Ильинский О.К. Охотский антициклон // Труды ДВНИГМИ. 1959. Вып. 7. С. 10-32.
8. Католикова В.М., Католикова Н.И. О возможных причинах изменения пропускной способности русла Амура у Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре // Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ЭСПэХа, 2015. 168 с. С. 63-83.
9. Махинов А.Н., В.И. Ким, Воронов Б.А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2. С. 5-14.
10. Мезенцева Л.И., Соколов О.В., Друзь Н.И. Атмосферная циркуляция над Дальним Востоком в 2013 г. при экстремальном наводнении в бассейне Амура // Известия ТИНРО. 2015. Том 180. С. 261-272.
11. Национальное управление океанических и атмосферных исследований NOAA. <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search?datasetid=GHCND>.
12. Пинскер А.А. Циркуляционные условия сильных дождей в Приморском крае в летний период // Труды ДВНИГМИ. 1983. Вып. 109. С. 75-84.
13. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть III. Выпуск 4. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 212 с.
14. Руководство по месячным прогнозам погоды. Л.: Гидрометеиздат. 1972. 366 с.
15. Сайт Дальневосточного УГМС. – <http://khabmeteo.ru/chart/index.shtml>.
16. Свиныхова Р.Э. Основные формы циркуляции и их связь с осадками на Дальнем Востоке // Труды ДВНИГМИ. 1978. Вып. 75. С. 67-78.
17. Семенов Е.К., Соколичина Н.Н., Татаринович Е.В., Тудрий К.О. Синоптические условия формирования катастрофического наводнения на Амуре в 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2014. № 8. С. 25-33.
18. Спутниковый мониторинг паводка на реке Амур в 2019 г. – <http://www.meteorf.ru/press/news/20204/>
19. Тетерятникова Е.П. Общие условия формирования катастрофических наводнений на р. Амур // Паводки и защита от них. М., 1968. С. 24–25.

20. Трусевский И.В., Ленин В.Т., Гаголка Н.К. К прогнозу общих условий осадкообразования в Приамурье на летний сезон с трехмесячной заблаговременностью // Труды ДВНИГМИ. 1980. Вып. 82. С. 28-34.

21. Шалыгин А.Л., Дугина И.О. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне Амура: причины, особенности, последствия // Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ЭсПЭХа, 2015. С. 22-35.

22. Японское Метеорологическое Агентство. – <http://ds.data.jma.go.jp/>

References

1. Bolgov, M.V., Trubetskova, M.D., Filippova, I.A., Kharlamov M.A. Characteristics of extreme precipitation events within the Amur river basin in summer 2013. *Geogr. Nat. Resour.*, 2017, vol. 38, pp. 139–146. <https://doi.org/10.1134/S1875372817020044>.

2. Bortin N.N., Milayev V.M. Examination of the Long-term Dynamics and the Scheme of Super-longterm Forecast for Inundation on the Amur River. *Vodnoe hozyaystvo Rossii [Water sector of Russia: problems, technologies, management]*, 2014, no. 4, pp. 45-59 [in Russ.].

3. Vasilevskaya, L.N., Shkaberda O.A., Lamash B.E., Platonova V.A., Kukarenko E.A. Long-period variability of temperature, precipitation and occurrence time of the second stage of summer monsoon around Peter the Great Bay. *Vestnik DVO RAN [Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences]*, 2013, vol. 172, no. 6, pp. 71-82 [in Russ.].

4. Gidrometeorologicheskii byulleten' [Hydrometeorological Bulletin], 2019, available at: <http://www.ferhri.ru/napravleniya-rabot/proekty/2017-07-28-00-41-16/gidrometeorologicheskii-byulleten-2019g.html>.

5. Danilov-Danilyan V.I., Gelfan A.N., Motovilov Y.G., Kalugin A.S. Disastrous flood of 2013 in the Amur basin: Genesis, recurrence assessment, simulation results. *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 2, pp. 115-125. DOI: 10.1134/S0097807814020055.

6. Ivanov V.A. Features of the Amur and Zeya level regime formation near the city of Blagoveshchensk during floods. Extreme floods in the Amur River basin: hydrological aspects. Papers on hydrology / Ed. V.Ju. Georgievsky, FSBI "SHI", St. Petersburg: SPH, 2015, pp. 91-101 [in Russ.].

7. Il'inskiy O.K. Ohotskiy anticiklon. *Trudy DVNIGMI*, 1959, vol. 7, pp. 10-32 [in Russ.].

8. Katolikov V.M., Katolikova N.I. On possible causes of changes in the Amur channel discharge capacity near Khabarovsk and Komsomolsk-on-Amur. Extreme floods in the Amur River basin: hydrological aspects. Papers on hydrology / Ed. V.Ju. Georgievsky, FSBI "SHI", St. Petersburg, SPH, 2015, pp. 63-83 [in Russ.].

9. Makhinov A.N., Kim V.I., Voronov B.A. Floods in the Amur Basin in 2013: causes and consequences. *Vestnik DVO RAN [Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences]*, 2014, no. 2, pp. 5-14 [in Russ.].

10. Mezentsева L.I., Sokolov O.V., Druz N.I. Atmosphere circulation over the Far East of Russia in 2013, during extreme flood in the Amur basin. *Izvestiya TINRO*, 2015, vol. 180, pp. 261-272. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-180-261-272. [in Russ.].

11. National oceanic and atmospheric administration NOAA. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search?datasetid=GHCND>.

12. Pinsker A.A. Cirkulyacionnye usloviya sil'nyh dozhdov v Primorskom krae v letniy period. *Trudy DVNIGMI*, 1983, vol. 109, pp. 75-84 [in Russ.].

13. *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody Chast' III. Vyp 4.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1965, 216 p. [in Russ.].

14. *Rukovodstvo po mesyachnym prognozam pogody.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1972, 366 p. [in Russ.].

15. _Dal'nevostochnoe UGMS. Available at: <http://khabmeteo.ru/chart/index.shtml> [in Russ.].

16. Svinuhova R.E. Osnovnye formy cirkulyatsii i ih svyaz' s osadkami na Dal'nem Vostoke. *Trudy DVNIGMI*, 1978, vol. 75, pp. 67-78 [in Russ.].

17. *Semenov, E.K., Sokolikhina, N.N., Tatarinovich, E.V., Tudrii K.O.* Synoptic conditions of the formation of a catastrophic flood on the Amur River in 2013. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, pp. 521–527. DOI: 10.3103/S1068373914080032.

18. Sputnikovyy monitoring pавodka na reke Amur v 2019 g. Available at: <http://www.meteorf.ru/press/news/20204/> [in Russ.].

19. *Teteryatnikova E.P.* Obshchie usloviya formirovaniya katastroficheskikh navodneniy na r. Amur // Pavodki i zashchita ot nih. Moscow, 1968, pp. 24–25 [in Russ.].

20. *Trusevskiy I.V., Lenshin V.T., Gagolka N.K.* K prognozu obshchih usloviy osadkoobrazovaniya v Priamur'e na letniy sezon s trekhmesyachnoy zablagovremennost'yu. *Trudy DVNIG-MI*, 1980, vol. 82, pp. 28–34 [in Russ.].

21. *Shalygin A.L., Dugina I.O.* Catastrophic 2013 flood in the Amur River basin: causes, features and consequences. Extreme floods in the Amur River basin: hydrological aspects. Papers on hydrology / Ed. V.Ju. Georgievsky, FSBI "SHI", St. Petersburg, SPH, 2015, pp. 22–35 [in Russ.].

22. Japan Meteorological Agency. Available at: <http://ds.data.jma.go.jp/>

Поступила в редакцию 15.02.2019 г.

Received by the editor 15.02.2019.

УДК 551.524.3

Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе

Е.М. Ладохина¹, К.Г. Рубинштейн^{1,2}, В.Ю. Цепелев³

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук, г. Москва, Россия;

³Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург, Россия
ladohina@meteo.nw.ru

Проанализированы ряды срочных метеорологических наблюдений за температурой воздуха в Санкт-Петербурге и на станциях Ленинградской области за период 1994–2018 гг. Выявлено наличие теплового возмущения на территории Санкт-Петербурга, составляющее $1,13^{\circ}$. Апробирована методика полуэмпирической модели интерполяции для расчета интенсивности температурных возмущений антропогенного происхождения в Санкт-Петербурге, основанная на восстановлении температуры невозмущенной мегаполисом местности, с помощью алгоритмов двумерной интерполяции. Для валидации результатов использована методика оценки разности температур большого города и пригородной станции. На основе результатов расчетов интенсивности острова тепла по двум методикам предложен критерий обнаружения и анализа интенсивности острова тепла. Показано, что наибольшие значения интенсивности острова тепла достигаются зимой, в феврале максимальные значения достигают $6,4^{\circ}$, средние – $3,0^{\circ}$. Показано также, что интенсивность острова тепла в Санкт-Петербурге имеет суточный ход: наибольшие и максимальные средние значения интенсивности приходятся на полночь и достигают $2,9^{\circ}$ и $5,2^{\circ}$ соответственно, наименьшие – на полдень и достигают $2,3^{\circ}$ и $3,8^{\circ}$ соответственно.

Ключевые слова: тепловое возмущение атмосферы мегаполиса, антропогенное воздействие на атмосферу, пространственная интерполяция данных наблюдений

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-109-125>

Identification of periods with maximum heat island intensity in St. Petersburg for the validation of numerical weather forecasts

E.M. Ladokhina¹, K.G. Rubinshtein^{1,2}, V.Y. Tsepelev³

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

²The Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

³Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia
ladohina@meteo.nw.ru

The series of routine meteorological observations of air temperature in St. Petersburg and at Leningrad region stations for the period 1994-2018 are analyzed. The air temperature perturbation in St. Petersburg equal to 1.13° is detected. The method of the semiempirical interpolation model for the calculation of intensity of anthropogenic temperature

perturbations in St. Petersburg is tested. The method is based on the retrieval of temperature in undisturbed areas using the algorithms of two-dimensional interpolation. The results are validated by the method for estimating the temperature difference between the big city and the suburban station. A criterion is developed for the detection and analysis of heat island intensity based on the results of its calculation by two methods. It is found that the highest values of heat island intensity are reached in winter, in February: the maxima reach 6.4° , the average values reach 3.0° . The intensity of the heat island in St. Petersburg is characterized by daily variations: the greatest maximum and average values are observed on midnight and reaches 2.9° and 5.2° , respectively, and the smallest ones are detected on noon and reaches 2.3° and 3.8° , respectively.

Keywords: metropolis air temperature perturbation, anthropogenic impact on the atmosphere, spatial interpolation of observational data

Введение

Наличие особых режимов температуры, ветра и влажности в крупных городах отмечалось еще в середине XIX века [6], и с тех пор города росли и рос эффект их влияния на окружающую атмосферу. На эту тему было опубликовано множество отечественных, например [1–4, 8], и зарубежных [17–20] работ по исследованию городского острова тепла (ОТ) и его воздействию на локальный климат. При этом развитие методов наблюдений и анализа характеристик погоды позволило сформировать новые подходы к изучению ОТ.

До начала компьютеризации исследование ОТ проводилось по данным наземных измерений на метеорологических станциях, и во многих исследованиях этот подход применяется до сих пор, поскольку позволяет дать адекватную количественную оценку интенсивности острова тепла. С развитием вычислительной техники и появлением спутниковой метеорологии появились новые методы изучения феномена ОТ: на основе численного моделирования [2, 17], спутникового [3] и других методов косвенного зондирования атмосферы [9]. В нашей статье приведем краткий обзор работ, посвященных исследованию климатического режима в крупных городах по данным наземных наблюдений на метеорологических станциях.

Цель этой работы – определить периоды наиболее интенсивных проявлений острова тепла в Санкт-Петербурге для дальнейшего использования количественных характеристик этих особенностей при валидации численного прогноза погоды для города. В большинстве исследований теплового влияния мегаполиса по данным наземных измерений за проявление городского острова тепла принимают положительную разность температуры между центральной частью города и его пригородами. Однако неоднородности в поле температуры на территории города могут возникать не только в результате антропогенного воздействия, но и по естественным причинам. Возникновение ситуаций, при которых вариации температуры воздуха из-за особенностей микроклимата и орографии местности ошибочно принимают за проявление антропогенного

воздействия [4], усложняет проблему выделения из множества факторов, определяющих пространственные изменения температуры воздуха, воздействия именно городской среды [19]. В нашей работе, как будет показано ниже, мы предприняли усилия для преодоления этого недостатка.

Материалы и методы исследования

В России основная часть работ по тематике анализа ОТ относится к исследованию климатического режима Москвы и Московского региона [1, 12, 16 и др.]. Этому есть несколько объективных причин: а) Москва самый большой по площади и численности населения город в России; б) территорию мегаполиса и его окрестности покрывает наиболее густая сеть метеорологических станций [12]. Количественные оценки среднегодовой интенсивности острова тепла в Московском регионе в вышеуказанных работах достаточно близки, несмотря на различия в размерах выборок и использовании данных измерений на разных пригородных станциях. Среднегодовая разность значений температуры между центром Москвы и его пригородами составляет порядка $2,3^{\circ}$. При оценке межсезонного показателя ОТ в исследованиях за более ранний период (1970–1990 гг.) приводятся данные, указывающие на большую интенсивность ОТ в осенне-зимний сезон, а за более поздний период (2012–2016 гг.) – в весенне-летний сезон. Во всех исследованиях при оценке суточной изменчивости отмечается, что усиление интенсивности ОТ в Москве приходится на ночные часы. Физические обоснования этого явления известны достаточно давно и связаны с разницей скоростей выхолаживания воздуха над территорией мегаполиса и пригородов [15].

Поскольку цель данной работы – поиск периодов ОТ наибольшей интенсивности в Санкт-Петербурге, обратимся к исследованиям предыдущих лет, посвященных сравнению параметров острова тепла Москвы и Санкт-Петербурга. Согласно [5, 13, 14], в Санкт-Петербурге наблюдается рост среднегодовой температуры, среднегодовая разность значений температуры между центром мегаполиса и его пригородами, осредненная за 20 лет, на 1° меньше, чем в Москве, и составляет порядка $1,2^{\circ}$. Периоды наибольшей интенсивности ОТ наблюдаются в обоих городах в зимний сезон. Интенсивность ОТ зимой в Санкт-Петербурге выше на $0,3^{\circ}$, чем летом; в Москве – на $0,4^{\circ}$. Проявление локальных климатических особенностей мегаполиса, в том числе острова тепла, наиболее хорошо выражено в малооблачную и безветренную погоду [7]. Поскольку почти в течение всего года в Санкт-Петербурге наблюдается преобладание циклонической циркуляции [6] со сложными погодными условиями, при которых локальные климатические особенности проявляются в меньшей степени, среднегодовая разность значений температуры между центром Санкт-Петербурга и его пригородами меньше, чем в Москве. Эффект сглаживается также близостью Финского залива.

Методика поиска ОТ на основании разности температур между центром мегаполиса и пригородами проста и относительно эффективна. Однако поиск случаев ОТ значительной интенсивности подразумевает использование срочных данных, в связи с чем погодные аномалии на пригородных станциях могут исказить поле температуры невозмущенной мегаполисом местности и привести к неверной оценке интенсивности ОТ. Чтобы избежать подобных результатов, а также исключить влияние микроклиматических особенностей местности на точность оценки интенсивности ОТ, необходимо как можно более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности. Эта задача была решена с помощью полуэмпирической модели интерполяции (ПМИ) [14], которая работает по следующему алгоритму. Выбирается несколько станций, окружающих большой город, и «сателлитная» станция, по данным с которой рассчитываются параметры интерполяционных формул, и анализируется точность алгоритма интерполяции.

Результатом работы интерполяционного алгоритма является восстановленное поле значений «виртуального аналога» станции большого города (далее – «виртуальной» станции), интерпретируемое как поле температуры в точке расположения городской станции, если бы мегаполиса не существовало. На последнем этапе находится разность между температурой на реальной станции и «виртуальной».

В исследовании по оценке нарушения естественного климатического режима в мегаполисе с помощью ПМИ [14] для уменьшения веса метеоэлемента в интерполяционной формуле использована экспоненциальная зависимость (1) с двумя весовыми коэффициентами (n, ρ). В данной работе, в связи с необходимостью обработки значительного объема данных, расчет интерполяционной формулы с двумя весовыми коэффициентами потребовал бы неоправданно больших затрат вычислительных и временных ресурсов. В связи с этим была произведена замена экспоненциальной зависимости на квадратичную (2) с одним весовым коэффициентом (ρ). За приемлемый минимум невязки принято значение $0,15^\circ$.

$$\left| \frac{\sum_{k=1}^M Y_{ij,k} \exp \left[- \left(r_{ok} / \rho_{ij} \right)^{n_{ij}} \right]}{\sum_{k=1}^M \exp \left[- \left(r_{ok} / \rho_{ij} \right)^{n_{ij}} \right]} - Y_{ij,0} \right| = \min, \quad (1)$$

$$\left| \frac{\sum_{k=1}^M Y_{ij,k} \left(r_{ok} / \rho_{ij} \right)^2}{\left(r_{ok} / \rho_{ij} \right)^2} - Y_{ij,0} \right| = \min, \quad (2)$$

где $Y_{ij,k}$ – значение температуры на пригородной станции; $Y_{ij,0}$ – значение температуры на «сателлитной» станции; M – количество пригородных станций; r_{ok} – мера расстояния.

В работе использована евклидова мера расстояния:

$$r_{ok} = \sqrt{\sum_{k=1}^M (x_k - y_k)^2}. \quad (3)$$

Согласно [14], «спутниковая» станция должна располагаться вне зоны влияния мегаполиса, на расстоянии 50–150 км от него, а также не на подветренной по отношению к мегаполису стороне. Оптимальным решением является выбор нескольких «спутниковых» станций. Выбор пригородных станций мегаполиса производится таким образом, чтобы значения исследуемой метеорологической характеристики на этих станциях были согласованы со значениями на «спутниковой» станции [11, 14], а для этого требуется оценить их репрезентативность. Оценка репрезентативности выборки производится путем анализа отклонений значений среднемесячных и среднегодовых температур за исследуемый период от климатической нормы – историческими усредненными значениями температуры за базовый 30-летний период [1]. В работе был использован период осреднения 1981–2010 гг., утвержденный Всемирной метеорологической организацией в качестве базового периода.

Приняв во внимание рекомендации к подбору станций, а также исходя из доступных для исследования данных наблюдений, было выбрано 15 станций Ленинградской области (далее – пригородных станций) для оценки их репрезентативности (рис. 1). Были проанализированы все данные срочных наблюдений за период с 1994 по 2018 г. Длина рядов составляет порядка 73000 значений.

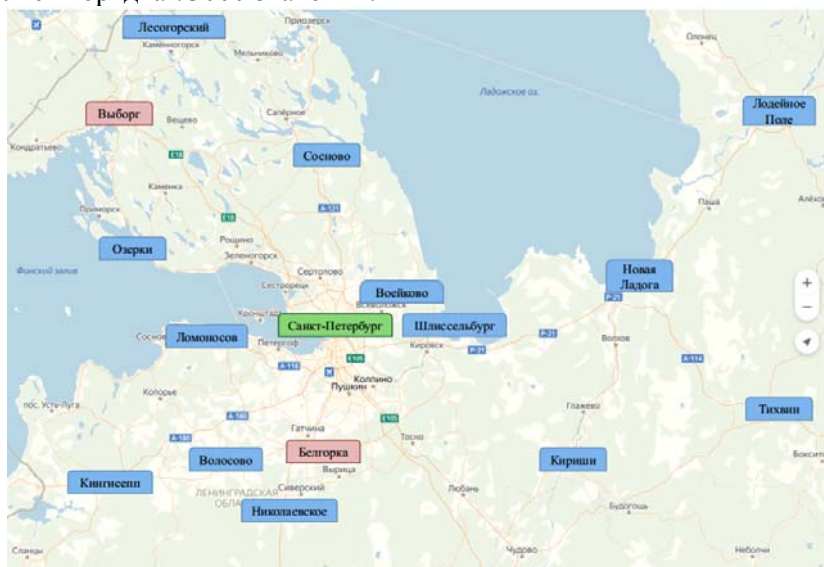


Рис. 1. Станции Ленинградской области, для исследования ОТ; красные – «спутниковые» станции, зеленая – «виртуальная».

Fig. 1. Stations of the Leningrad region for the research of the Urban Heat Island (UHI); «satellite» stations are colored in red, the «virtual» station – in green.

Согласно результатам расчета отклонений среднемесячной температуры от климатической нормы (таблица), большую часть года среднемесячные значения температуры на станциях соответствуют климатической норме, отклонения более 1° наблюдаются в осенне-зимний период, наибольшие превышения нормы отмечены в декабре. Отклонение осредненной по всем пригородным станциям средней годовой температуры от климатической нормы составляет $+0,4^{\circ}$. Для 8 исследуемых станций отклонение средней годовой температуры от климатической нормы превышает эту величину на $0,1^{\circ}$, для остальных – равно осредненной величине. Таким образом, наблюдения за температурой воздуха достаточно однородны в сравнении с климатической нормой, а значит, данные репрезентативны и могут быть использованы для исследования термического режима Ленинградской области.

Таблица. Отклонение среднемесячной температуры за 1994–2018 гг. от климатической нормы

Table. The deviation of the average monthly temperature from the climatic norm for 1994–2018.

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Лесогор.	0,4	0,4	0,0	0,4	0,3	0,5	0,1	0,6	0,8	0,1	1,0	1,0	0,5
Выборг	0,5	0,4	0,1	0,6	0,6	-0,1	0,2	0,8	0,9	0,0	0,9	1,2	0,5
Л. Поле	0,4	0,3	-0,3	0,7	0,4	-0,2	0,3	0,5	0,7	0,0	1,0	1,0	0,4
Сосново	0,4	0,4	0,0	0,8	0,6	0,1	0,2	0,7	0,9	0,2	1,0	1,0	0,5
Н. Ладога	0,3	0,2	-0,2	0,6	0,5	0,0	0,2	0,6	0,8	0,1	0,8	1,0	0,4
Озерки	1,2	1,3	-0,3	-0,1	-0,3	-0,2	0,2	0,7	0,8	0,1	0,9	1,1	0,5
Воейково	1,5	-0,2	0,1	0,4	0,1	-0,1	-0,3	0,4	1,0	0,4	1,0	1,0	0,5
Шлисс.	0,3	0,3	0,0	0,7	0,5	0,1	0,3	0,6	0,8	0,0	0,9	1,0	0,4
Ломоносов	0,4	0,6	0,5	0,8	0,6	0,6	-0,3	-0,1	0,3	-0,6	1,5	1,6	0,5
Тихвин	0,3	0,3	-0,2	0,8	0,4	-0,1	0,3	0,6	0,8	0,1	1,0	1,0	0,5
Кингисепп	0,1	0,2	0,0	0,6	0,5	0,4	0,3	0,0	0,4	-0,2	1,2	1,5	0,4
Волосово	0,3	0,4	0,1	0,6	0,4	0,0	0,1	0,6	0,8	-0,4	1,0	1,5	0,4
Белогор.	1,2	1,3	1,2	0,9	-1,1	-0,8	-0,9	0,3	0,8	-0,3	1,0	1,3	0,4
Кириши	0,9	-0,2	0,2	1,1	0,4	0,3	0,2	0,5	0,5	-0,4	1,1	1,2	0,5
Николаев.	0,5	0,8	0,7	-0,3	-0,5	0,0	0,3	0,4	0,7	-0,1	0,9	0,9	0,4
Среднее	0,6	0,4	0,1	0,6	0,2	0,0	0,1	0,5	0,7	-0,1	1,0	1,1	0,4

В качестве данных, отражающих температурный режим мегаполиса, были использованы срочные измерения с объединенной метеорологической станции Петроградского района Санкт-Петербурга («ОГМС Санкт-Петербург»). Средняя годовая температура на станции за исследуемый период превышает осредненную по всем пригородным станциям

среднюю годовую температуру на $1,13^\circ$, что согласуется с оценками в исследованиях предыдущих лет и подтверждает наличие теплового возмущения в городе.

Согласно исследованию [6], в Санкт-Петербурге преобладают ветры западных, юго-западных направлений, поэтому «сателлитные» станции, как менее подверженные влиянию города, должны располагаться западнее или южнее Санкт-Петербурга. Для исследования влияния антропогенных факторов на поле значений температуры (и других метеозлементов) в Санкт-Петербурге традиционно выбирается пригородная метеостанция Белогорка, кроме нее в данной работе были использованы данные наблюдений на станции Выборг. Для удобства изложения результатов введем обозначения систем «Санкт-Петербург – Белогорка» (СБ) и «Санкт-Петербург – Выборг» (СВ), указывающие на то, данные какой «сателлитной» станции были использованы при расчетах интенсивности острова тепла.

При расчете интенсивности ОТ с помощью ПМИ минимум функционала (2) был достигнут примерно в 97 % случаев, что является достаточным для наблюдения высокоинтенсивных температурных возмущений антропогенного происхождения, а также является еще одним подтверждением репрезентативности данных наблюдений. В небольшом количестве случаев использование неосредненных данных привело к расчету весового коэффициента ρ по аномальным значениям температуры на «сателлитной» станции. Как следствие, коэффициент ρ , при котором было достигнуто точное решение минимизации функционала (2) в методике ПМИ, был подобран так, чтобы подстроить значения температуры на пригородных станциях под аномальное значение на «сателлитной» станции. При использовании такого значения ρ для расчета температуры на «виртуальной» станции получались неправдоподобные значения. Такие выбросы отслеживались и отфильтровывались после ранжирования результатов работы алгоритма. Значения интенсивности ОТ, полученные с использованием полуэмпирической модели интерполяции, были сопоставлены со значениями температурных возмущений (Δt), рассчитанных по методике оценки разности температур большого города ($t_{\delta z}$) и «сателлитной» станции (t_{cc}).

$$\Delta t = t_{\delta z} - t_{cc}. \quad (4)$$

Результаты

На рис. 2 в виде графиков временного хода представлены результаты расчета интенсивности ОТ методами полуэмпирической модели интерполяции (*virt*) и разности температур (*delta*) для систем СБ и СВ. Для анализа интенсивности ОТ были введены два независимых критерия его наличия: $delta > 2^\circ$ и $virt > 2^\circ$. В качестве нижнего предела использовалось значение интенсивности ОТ, равное 2° , что позволило исключить

Чтобы определить периоды максимальной интенсивности теплового возмущения мегаполиса, был проанализирован сезонный ход значений интенсивности ОТ по трем критериям с помощью диаграмм размаха, или «ящиков с усами» (рис. 3). Нижней границей «усов» служит разность первого квартиля и полутора межквартильных расстояний, верхней – сумма третьего квартиля и полутора межквартильных расстояний.

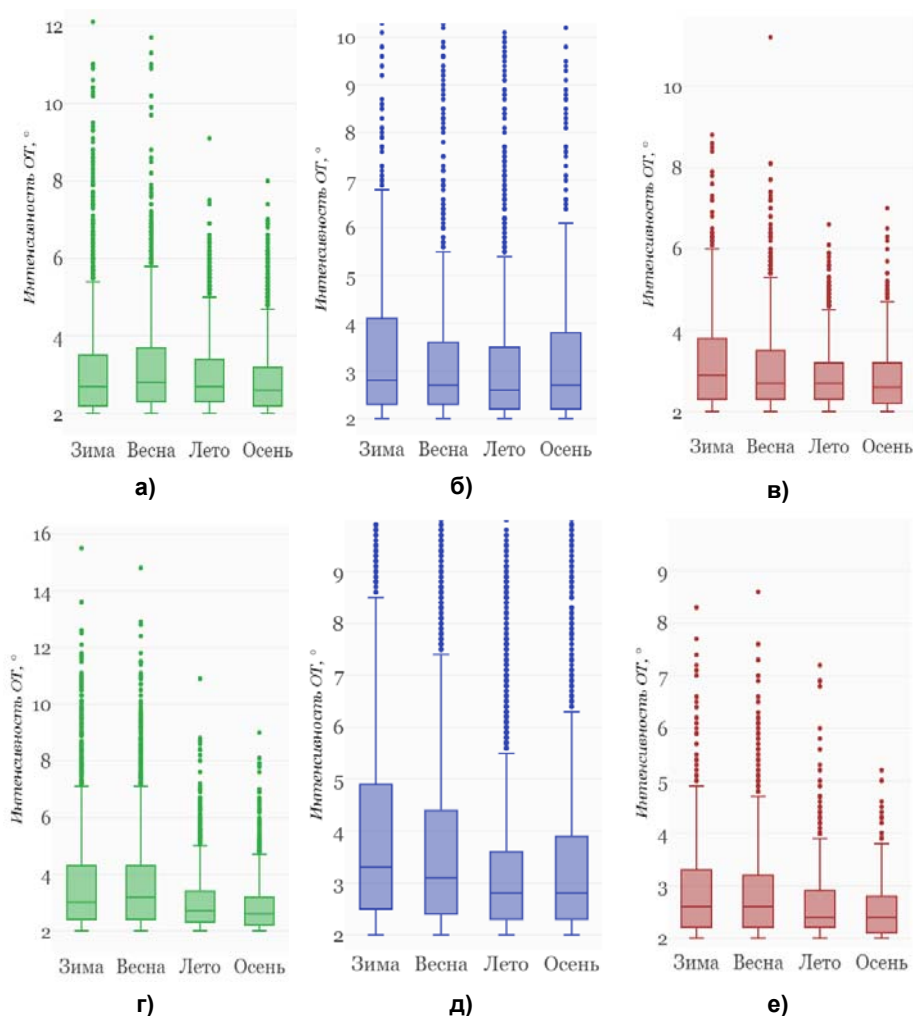


Рис. 3. Диаграммы размаха сезонного хода значений интенсивности ОТ для системы СБ (а, б, в) и системы СВ (г, д, е) по критериям $\delta > 2^\circ$, $\text{virt} > 2^\circ$, $\delta > (\text{virt} > 2^\circ)$ соответственно.

Fig. 3. Box-and-whiskers plots of the seasonal time course of UHI intensity values for St. Petersburg – Belogorka (SB) system (a, б, в) and for St. Petersburg – Vyborg (SV) system (г, д, е) according to $\delta > 2^\circ$, $\text{virt} > 2^\circ$, $\delta > (\text{virt} > 2^\circ)$ criteria respectively.

Хорошо видно, что для обеих систем как средние, так и максимальные значения интенсивности ОТ, отобранные по второму и третьему критериям, наблюдаются зимой, а минимальные – летом. Зимой среднее значение интенсивности ОТ по второму критерию для СВ составляет $3,3^\circ$, максимальные достигают $8,5^\circ$; для СБ среднее значение – $2,8^\circ$, максимальные достигают $6,8^\circ$. По комбинированному критерию зимой для СВ средние и максимальные значения интенсивности ОТ ниже, чем по второму, и составляют $2,6^\circ$ и $4,9^\circ$ соответственно. Для СБ по комбинированному критерию максимальное значение интенсивности также ниже, чем по второму и составляет $6,0^\circ$, а среднее выше на $0,1^\circ$. Летом по второму критерию для СВ средние и максимальные значения интенсивности ОТ составляют $2,6^\circ$ и $5,4^\circ$ соответственно, по комбинированному – $2,7^\circ$ и $4,5^\circ$ соответственно.

При более детальном рассмотрении каждого зимнего месяца с помощью построения диаграмм размаха обнаружено, что по комбинированному критерию наибольшие средние и максимальные значения интенсивности ОТ для систем СБ и СВ отмечаются в феврале. Максимальные значения для СБ и СВ достигают $6,4^\circ$ и $4,9^\circ$ соответственно; средние – $3,0^\circ$ и $2,6^\circ$ соответственно.

Пример проявления ОТ значительной интенсивности в феврале 2011 г. приведен на рис. 2б, г. Интенсивность ОТ, рассчитанная по методу разностей, максимальна 21 февраля для системы СВ и 22 февраля для системы СБ и составляет 13° и 14° соответственно. Эти значения характеризуют интенсивность теплового возмущения, возникшего в результате совместного влияния микроклиматических и антропогенных факторов. Наложение результатов расчета интенсивности ОТ с использованием ПМИ позволяет выявить, что интенсивность антропогенного теплового возмущения 21–22 февраля составляет порядка 5° , а максимум интенсивности антропогенного теплового возмущения для обеих систем приходится на 25 февраля (18 ч ВСВ) и равен $7,5^\circ$. По данным станции «ОГМС Санкт-Петербург» в ночь с 21 на 22 февраля в городе наблюдалась безветренная погода, более 90 % неба было закрыто слоисто-кучевыми облаками, город находился в области высокого давления (1035 гПа). Вечером 25 февраля, в период максимума интенсивности ОТ, на станции наблюдался слабый ветер (2 м/с), высокое атмосферное давление (1038 гПа) и отсутствие облаков.

Для валидации краткосрочного численного прогноза погоды в городе важно установить точную дату максимума антропогенного возмущения поля температуры и наблюдавшиеся при этом метеорологические условия. В данном примере метеорологические условия в день наблюдения максимума интенсивности ОТ, рассчитанного с помощью ПМИ, отличаются от метеорологических условий в день наблюдения максимума интенсивности острова тепла, рассчитанного по методу разностей.

При использовании разных критериев поиска ОТ было получено разное количество случаев его проявления за весь исследуемый период. Число случаев температурного возмущения, полученное с использованием критерия II, одинаково для обеих систем (разница составляет менее 1 тыс. случаев) и равно 11,5 тыс. Наибольшее количество случаев (порядка 17,5 тыс. для системы СБ и 15 тыс. для системы СВ) получено по критерию II, наименьшее – по комбинированному критерию III (7 тыс. для СБ и 3 тыс. для СВ). В случае применения критерия III количество ОТ для СБ более чем в 2 раза превышает их число для СВ. Для корректной работы комбинированного критерия обнаружения ОТ необходимо, чтобы результаты расчетов интенсивности ОТ методом разностей и с помощью ПМИ были взаимосвязаны, т. е. чередование максимальных и минимальных интенсивностей ОТ, рассчитанных по обоим методам, должно быть согласованным.

Количественную оценку степени связанности двух случайных величин отражает коэффициент корреляции. Сравнение коэффициентов корреляции между значениями интенсивности ОТ, рассчитанными двумя методами для систем СБ и СВ, позволит установить, по данным какой именно «спутниковой» станции удалось более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности.

Применение линейных методов статистического анализа возможно только для непрерывных рядов данных, подчиняющихся закону нормального распределения. Ввиду фильтрации выбросов, а также из-за пропусков в данных наблюдений, ряды результирующих характеристик (расчетов интенсивности ОТ методом разностей и с помощью ПМИ) являлись неполными, поэтому были произведены дополнительные действия для их подготовки к статистическому анализу.

Для оценки принадлежности распределения к нормальному закону необходимо при наличии пропуска в рядах результирующих характеристик за какой-либо срок полностью исключить весь день из анализа. Согласно [15], интенсивность ОТ имеет суточный ход: для большинства городов днем наблюдается минимум интенсивности ОТ, а вечером или ночью – максимум. Чтобы сохранить зависимость интенсивности ОТ от суточного хода и не исключать большое количество дней из-за пропусков одного из восьми сроков наблюдений, для обеих систем были построены диаграммы размаха интенсивности ОТ, отобранных по первому и второму критериям, для восьми сроков наблюдения (рис. 4).

Анализ диаграмм позволил выбрать два срока, для которых наблюдается наибольшая и наименьшая интенсивность ОТ. В полдень (12 ч ВСВ) для системы СБ по обоим критериям наблюдаются наименьшие средние и максимальные значения интенсивности ОТ, а для системы СВ – наибольшие. В ночные часы в интервале с 21 до 03 ч ВСВ для системы СБ наблюдаются наибольшие средние и максимальные значения интенсивности ОТ, а для системы СВ – наименьшие.

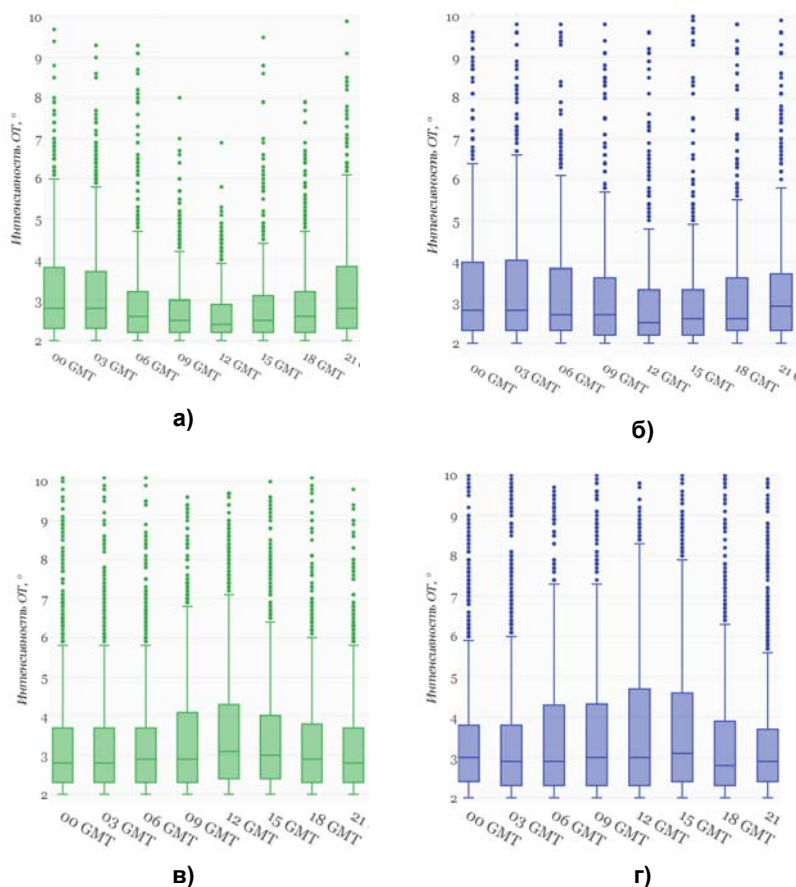


Рис. 4. Диаграммы размаха суточного хода значений интенсивности ОТ для систем СБ (а, б) и СВ (в, г) по критериям I и II соответственно.

Fig. 4. Box-and-whiskers plots of the daily time course of UHI intensity values for SB (а, б) and SV systems (в, г) by $\delta > 2^\circ$, $virt > 2^\circ$ criteria respectively.

Таким образом, проверка на нормальность ряда была проведена для результатов расчетов интенсивности ОТ методом разностей и с помощью ПМИ за сроки 00 и 12 ч ВСВ. При наличии пропуска за какой-либо срок, весь день полностью исключался из анализа. Были построены квантильные графики, где по оси X отложены значения, взятые из стандартного нормального распределения, а по оси Y – ранжированные от минимального к максимальному результаты расчетов интенсивности ОТ методом разности или с помощью полуэмпирической модели интерполяции [10].

Анализ графиков показал, что распределение результатов расчетов интенсивности ОТ по обоим методам, несмотря на большой объем выборки, не подчинено нормальному закону, поэтому корреляционный анализ был проведен путем расчета коэффициента ранговой корреляции

Спирмена (r_s). Для СБ выявлена сильная корреляционная связь ($r_s = 0.69$) между результатами расчетов по двум критериям, а для СВ – слабая корреляционная связь ($r_s = 0.28$). Статистическая значимость коэффициентов корреляции для обеих систем составляет 99 %. Таким образом, по данным «спутниковой» станции Белогорка удалось более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности для корректного использования комбинированного критерия обнаружения ОТ. Наибольшие, как средние, так и максимальные значения интенсивности ОТ, наблюдаются зимой и составляют $2,9^\circ$ и $6,0^\circ$ соответственно, а наименьшие – летом, $2,7^\circ$ и $4,5^\circ$ соответственно. Для демонстрации эффективности использования полуэмпирической модели интерполяции при фильтрации микроклиматических колебаний обратимся к графикам временного хода значений интенсивности ОТ за ноябрь 2014 г. (рис. 5).

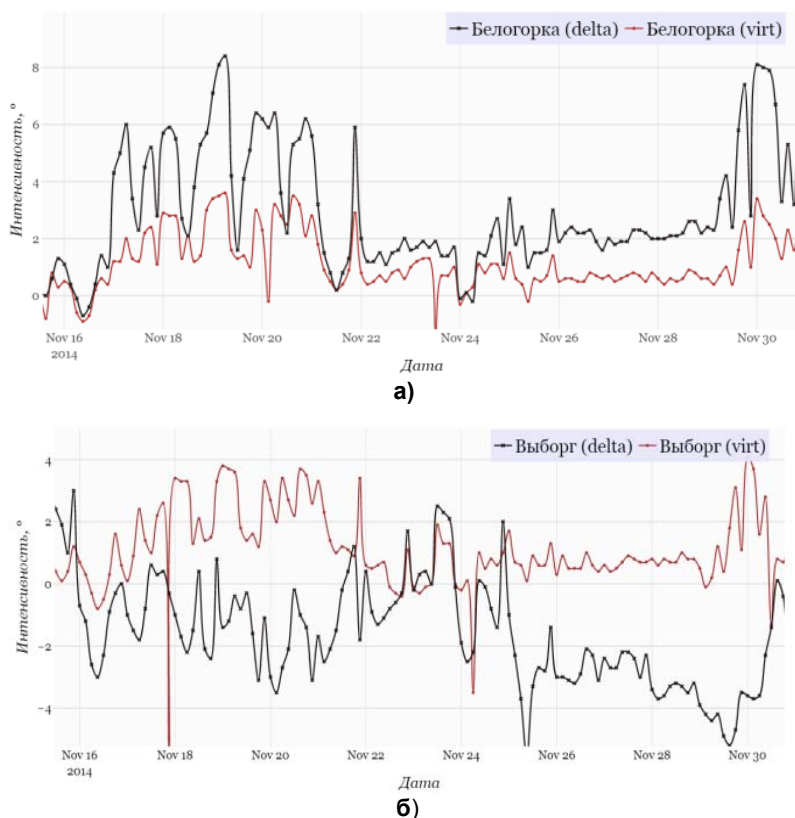


Рис. 5. Графики временного хода значений интенсивности ОТ, рассчитанных по методу разностей (*delta*) и с помощью ПМИ (*virt*), для ст. Белогорка (а) и ст. Выборг (б) за 11.2014 г.

Fig. 5. Charts of the time course of UHI intensity values calculated by the method of differences (*delta*) and by using SIM (*virt*), for Belogorka (а) and Vyborg (б) for 11.2014.

Для системы СБ 18–21 и 30 ноября интенсивность теплового возмущения, рассчитанная по методу разностей, составляла около 8° , а рассчитанная с помощью ПМИ была значительно меньше – около $3,5^{\circ}$. Для СВ по критерию I поиска ОТ тепловое возмущение в конце ноября не наблюдалось, а по критерию II его интенсивность совпадала со значениями для СБ ($3,5^{\circ}$). Поэтому даже при неудачном (основываясь на величине коэффициента корреляции) выборе «спутниковой» станции значения интенсивности ОТ, рассчитанные с использованием ПМИ, будут близки к истинным.

Тем не менее, обоснованный выбор «спутниковой» станции остается крайне важным, поскольку от него зависит количество случаев ОТ, которое будет найдено по комбинированному критерию. Если температура на «спутниковой» станции выше, чем на пригородных станциях, то тепловое возмущение не фиксируется (интенсивность ОТ по методу разностей будет меньше интенсивности ОТ, рассчитанной с помощью ПМИ). Из-за этой особенности для системы СВ по комбинированному критерию было найдено практически в два раза меньше случаев ОТ.

Заключение

Анализ значений средней годовой температуры в Санкт-Петербурге за период 1994–2018 гг. и значений средней годовой температуры, осредненной по всем пригородным станциям, позволил установить наличие теплового возмущения на территории Санкт-Петербурга с интенсивностью $1,13^{\circ}$. Этот результат количественно согласуется с исследованиями предыдущих лет.

Для расчета интенсивности температурных возмущений антропогенного происхождения в Санкт-Петербурге использована методика полуэмпирической модели интерполяции. Характеризуя данную методику, необходимо отметить, что она позволяет:

- 1) воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности, учитывая значения температуры, полученные по данным измерений на всех имеющихся в распоряжении пригородных станциях с помощью алгоритма двумерной интерполяции;

- 2) исключить влияние микроклиматических особенностей местности на точность оценки интенсивности ОТ.

Помимо вышеуказанных преимуществ, методика ПМИ имеет следующие особенности: не во всех случаях удастся достичь минимума невязки в результате работы интерполяционного алгоритма; даже при достижении минимума невязки в небольшом количестве случаев возникают неправдоподобные значения температуры на «виртуальной» станции. Поэтому была использована методика расчета интенсивности ОТ методом разностей и выработан комбинированный критерий, согласно которому температурное возмущение фиксировалось в случае, если значение интенсивности ОТ, полученное методом ПМИ, превышало 2° и было

меньше значения интенсивности ОТ, рассчитанного по методике разности температур.

В ходе анализа значений интенсивности ОТ, рассчитанных с использованием комбинированного критерия, были получены следующие результаты:

- интенсивность острова тепла в Санкт-Петербурге имеет суточный ход: наибольшие средние и максимальные значения интенсивности приходятся на 00 ч ВСВ и достигают $2,9^{\circ}$, $5,2^{\circ}$ соответственно, а минимальные – на 12 ч ВСВ и достигают $2,3^{\circ}$, $3,8^{\circ}$ соответственно;

- в зимний сезон наибольшие значения интенсивности ОТ достигаются в феврале: максимальные значения – $6,4^{\circ}$, средние – $3,0^{\circ}$;

- интенсивность ОТ в Санкт-Петербурге имеет суточный ход: наибольшие средние и максимальные значения интенсивности приходятся на 00 ч ВСВ и достигают $2,9^{\circ}$ и $5,2^{\circ}$ соответственно, а минимальные – на 12 ч ВСВ и достигают $2,3^{\circ}$ и $3,8^{\circ}$ соответственно.

Численные эксперименты по краткосрочному прогнозу погоды в Санкт-Петербурге будут проведены для зимнего сезона, конкретно для февраля, а полученные в этом исследовании значения интенсивности ОТ за указанный период будут использованы для их валидации.

Данная работа является важным этапом выявления метеорологических особенностей Санкт-Петербурга для будущей валидации численного прогноза температуры. Наряду с изменениями температурного режима мегаполис оказывает значительное влияние на поле ветра и влажности характеристик. В дальнейшем для более полного представления о влиянии мегаполиса на поля метеорологических элементов следует рассмотреть степень воздействия мегаполиса на количество выпавших осадков на прилегающих к нему территориях и на скорость и направление воздушных потоков, пересекающих большой город.

Список литературы

1. Брусова Н.Е., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Тепловое возмущение мегаполиса на фоне региональной неоднородности поля приземной температуры // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 22-34.
2. Гаврилова Ю.В., Смышляев С.П., Махура А.Г. Модельное исследование влияния крупных городов на региональные аспекты погоды // Ученые записки РГГМУ. 2010. Вып. 15. С. 107–116.
3. Горный В.И., Лялько В.И., Крижук С.Г. и др. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 176-191.
4. Демин В.И., Козелов Б.В., Елизарова Н.И., Меньшов Ю.В. Влияние микроклимата на точность оценки городского «острова тепла» // Труды ГГО. 2017. Вып. 584. С. 74-93.
5. Карлин Л.Н., Ефимова Ю.В., Никифоров А.В. Некоторые климатические характеристики Санкт-Петербурга в эпоху глобального потепления // Ученые записки РГГМУ. 2005. № 1. С. 22-29.
6. Климат Ленинграда. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 252 с.
7. Климат Москвы в условиях глобального потепления. М.: Из-во МГУ, 2017. 288 с.

8. Кондратьев К.Я., Матвеев Л.Т. Основные факторы формирования острова тепла в большом городе // Доклады Академии Наук. Серия: Геофизика. 1999. Т. 367. № 2. С. 253-256.
9. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Сезонные особенности термической структуры нижних слоев атмосферы в московском мегаполисе по данным микроволновых измерений температуры // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 389-400.
10. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
11. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата. СПб.: РГГМУ, 2005. 327 с.
12. Матвеев Л.Т. Влияние большого города на метеорологический режим // Известия РАН. Серия географическая 2007. № 4. С. 97-102.
13. Матвеев Л.Т., Вершель Е.А., Матвеев Ю.Л. Влияние антропогенных факторов на климат городов // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 17. С. 41-50.
14. Менжулин Г.В., Павловский А.А. Комплексная методика расчета и оценки нарушений естественного климатического режима в мегаполисе Санкт-Петербург // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 43. С. 154-173.
15. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 360 с.
16. Рубинштейн К.Г., Гинсбург А.С. Оценки изменения температуры воздуха и количества осадков в крупных городах (на примере Москвы и Нью-Йорка) // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С. 29-38.
17. Howard L. The Climate of London. London: Harvey and Darton, 1983. Vol 1.
18. Lin C.Y. et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan // Atmospheric Environment. 2008. Vol. 42, no. 22. P. 5635-5649.
19. Oke T.R., Maxwell G.B Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver // Atmospheric Environment. 1975. Vol. 9, no. 2. P. 191-200.
20. Stewart I.D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature // Int. J. Clim. 2011. Vol. 31, no. 2. P. 200-217.
21. Szymanowski M. Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of Wrocław, Poland // Theoretical and Applied Climatology. 2005. Vol. 82 (3-4). P. 207-224.

References

1. Brusova N.E., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I. Thermal disturbance in the megapolis on the background of the regional surface air temperature variability. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 22-34 [in Russ.].
2. Gavrilova Y.V., Smyshlyaev S.P., Mahura A.G.. A model study of the megacities effects to the regional aspects of weather. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2010, vol. 15, pp. 107-116 [in Russ.].
3. Gornyy V.I., Lyalko V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Filippovich V.E., Stankevich S.A., Brovkina O.V., Kiselev A.V., Davidan T.A., Lubsky N.S., Krylova A.B. Forecast of Saint-Petersburg and Kiev thermal replies on climate change (on the basis of EOS and Landsat satellite imagery. *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2016, vol. 13, no. 2, pp. 176-191. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-176-191 [in Russ.].
4. Demin V. I., Kozelov B. V., Elizarova N. I., Menshov Yu. V. Microclimate influence on accuracy of the estimation of urban heat island. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2017, vol. 584, pp. 74-93 [in Russ.].
5. Karlin, L.N., Efimova, J.V., Nikiforov, A.V. Climatic characteristics of St. Petersburg in the period of global warming. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2005, no. 1, pp. 22-29 [in Russ.].
6. Klimat Leningrada [Climate of Leningrad]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1982, 252 p. [in Russ.].

7. Klimat Moskvy v usloviyah global'nogo potepleniya. Moscow, MSU publ., 2017, 288 p. [in Russ.].
8. Kondrat'ev K.YA., Matveev L.T. Osnovnye faktory formirovaniya ostrova tepla v bol'shom gorode. *Izvestiya AN. Seriya Geofizika*, 1999, vol. 367, no. 2, pp. 253-256. [in Russ.].
9. Kuznetsova I.N., Nahaev M.I. Sezonnye osobennosti termicheskoy struktury nizhnih sloev atmosfery v moskovskom megapolise po dannym mikrovolnovykh izmereniy temperatury // 80 let Gidrometcentru Rossii. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 389-400 [in Russ.].
10. Malinin V.N. Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii. Saint Petersburg, RGGMU, 2008, 408 p. [in Russ.].
11. Matveev L.T., Matveev Yu.L. Oblaka i vihri – osnova kolebaniy pogody i klimata. Saint Petersburg, RGGMU, 2005, 327 p. [in Russ.].
12. Matveev L.T. Vliyaniye bol'shogo goroda na meteorologicheskiiy rezhim. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2007, no. 4, pp. 97-102 [in Russ.].
13. L.T. Matveev, E.A. Vershel, U.L. Matveev. The influence of anthropogenic factors on the climate in cities and towns. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2011, no. 17, pp. 41-50. [in Russ.].
14. Menzhulin G.V., Pavlovskii A.A. Combined technique for analysis of natural climate inflections by megacities: evaluations for Saint-Petersburg. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2016, no. 43, pp. 154-173 [in Russ.].
15. Oke T.R. Klimaty pogranichnogo sloya. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1982, 360 p. [in Russ.].
16. Rubinshtein K. G., Ginzburg A. S. Estimation of Air Temperature and Precipitation Changes in Large Cities (by Example of Moscow and New York). *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2003, vol. 28, no. 2, pp. 20-26.
17. Howard L. The Climate of London. London: Harvey and Darton, 1983, vol 1.
18. Lin C.Y. et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. *Atmospheric Environment*, 2008, vol. 42, no. 22, pp. 5635-5649.
19. Oke T.R., Maxwell G.B Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, 1975, vol. 9, no. 2, pp. 191-200.
20. Stewart I.D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *Int. J. Clim.*, 2011, vol. 31, no. 2, pp. 200-217.
21. Szymanowski M. Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of Wrocław, Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, vol. 82, no. 3-4, pp. 207-224.

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

Received by the editor 20.04.2020.

УДК 551.590.22+551.509.33

Перигейно-сизигийные приливы в атмосфере

Н.С. Сидоренков, В.Н. Петров

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
sidorenkov@mecom.ru*

Показано, что в 2016 и 2017 годах сглаженные аномалии температуры воздуха на Европейской территории России повторяли ход перигейного расстояния Луны. Описана природа 206-суточного лунного цикла. Исследованы сизигийные приливы в атмосфере, которые проявляются в колебаниях атмосферного давления, подобно перигейно-сизигийным колебаниям уровня моря. Найдена основная закономерность перигейно-сизигийных приливов: биения аномалий атмосферного давления для новолуний и полнолуний. Аномалии давления в полнолуния и новолуния можно аппроксимировать синусоидами с периодами, огибающими биения, около 412 суток и противоположными фазами. Размах колебаний в пучностях достигает 40 мб, что по порядку величины вполне сопоставимо с реальными синоптическими колебаниями атмосферного давления. Описаны нарушения сезонного хода погоды, обусловленные 206-суточной лунной цикличностью.

Ключевые слова: лунно-солнечные приливы, лунные циклы, долгосрочные прогнозы погоды, изменения климата

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-126-140>

Peregee-syzygy tides in atmosphere

N.S. Sidorenkov, V.N. Petrov

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
sidorenkov@mecom.ru*

It was shown that in 2016 and 2017, smoothed air temperature anomalies in the European territory of Russia repeated the course of the perigee distance of the Moon. The nature of the 206-day lunar cycle is described. Syzygy tides in the atmosphere, which are manifested in fluctuations in atmospheric pressure similar to perigee-syzygy fluctuations in sea level, are studied. We found the main pattern of perigee-syzygy tides: the beating of pressure anomalies for new moons and full moons. Pressure anomalies in the full moon and new moon can be approximated by sinusoids with periods of beating envelopes of about 412 days and opposite phases. The range of oscillations in antinodes reaches 40 mb, which is quite comparable in order of magnitude with real synoptic atmospheric pressure fluctuations. Violations of the seasonal course of weather caused by 206-day lunar cyclicity are described.

Keywords: lunisolar tides, lunar cycles, weather forecast, climate changes

Введение

Считается, что в атмосфере проявляются только термические приливы, обусловленные, во-первых, нагреванием атмосферы от земной и водной поверхности, которая непосредственно поглощает солнечную

радиацию, и, во-вторых, вследствие поглощения солнечной радиации озоновым слоем в стратосфере. Естественно, что термические приливы имеют солнечную суточную частоту и ее субгармоники (12 ч, 8 ч и т. д.), Гравитационные приливы, вызываемые притяжением Луны и Солнца, принято считать ничтожно малыми, не оказывающими никакого влияния на синоптические процессы в атмосфере [7, 12]. Однако в процессе мониторинга лунносолнечных приливных колебаний скорости вращения Земли было выяснено, что процессы в атмосфере тяготеют к синхронному изменению с экстремумами приливных колебаний скорости вращения Земли [3]. Выяснилось, что спектр момента импульса глобальной атмосферы имеет лунные составляющие с периодами лунного года 355 суток, а также половины (13,6 суток) и четверти (7 суток) лунного месяца [9]. При проведении спектрального анализа многолетнего ряда аномалий среднесуточной температуры воздуха в Москве были выявлены лунные составляющие с периодами 355; 206; 87 и 27 суток [9].

Жаркое лето 2010 года наглядно подтвердило существование и значение 355-суточной лунной составляющей [6]. Цель настоящей работы – обратить внимание на яркое проявление 206-суточного лунного цикла в погоде 2016–2017 гг. и связанных с ним перигейно-сизигийных приливов (во время полнолуний и новолуний).

206-суточный лунный цикл развития погодных процессов на Европейской территории России (ЕТР) впервые был замечен нами в 2017 году. Весна 2017 года преподнесла необычный сюрприз в развитии погодных процессов на ЕТР. Уже со второй декады февраля днем температура воздуха поднималась до оттепелей, а в третьей декаде февраля среднесуточные значения температуры стали положительными. 1 марта во многих городах ЕТР были перекрыты абсолютные максимумы температуры. Температура достигла значений характерных для середины апреля. Происходило быстрое таяние снежного покрова. В экстремально ранние сроки вскрылись реки Дон, Ока, Днепр, Западная Двина, Волга. Во второй декаде апреля рост температуры прекратился, отрицательные аномалии температуры сохранялись до последних чисел апреля. После четырехдневной волны летнего тепла, с 4 мая снова температура опустилась до апрельских значений. В третьей декаде мая температура стала возвращаться к нормальным значениям. Но в первых числах июня снова вторглась волна холодного арктического воздуха, приблизив значения температуры к экстремально низким значениям. Во многих областях ЕТР в июне (т. е. в экстремально поздние сроки) еще отмечались заморозки.

В средствах массовой информации широко обсуждалось аномальное течение погоды весной и летом 2017 года. Высказывались мнения, что это действие климатического оружия, но в большинстве случаев – что это обычная, свойственная погодным процессам, случайная флуктуация температуры. Однако в природе нередко процессы, считающиеся, из-за

недостатка знаний о них, случайными, оказывались вполне объяснимыми и закономерными. Поэтому рассмотрим более внимательно эволюцию аномалий температуры на ЕТР.

1. Данные наблюдений и их анализ

В Гидрометцентре России ведется база MIDL, в которой в оперативном режиме по технологии А.Н. Багрова [1] вычисляются аномалии среднесуточной температуры примерно по 2700 станциям Северного полушария. Среднесуточные нормы температуры каждой станции вычислены по среднемесячным нормам по методу кусочно-параболической аппроксимации [2]. Мы использовали данные базы MIDL по нескольким станциям ЕТР.

На рис. 1 представлен ход аномалий среднесуточной температуры в Москве за 2016/2017 гг. Видны их большие межсуточные флуктуации. В работах автора [3, 9, 10] показано, что внутримесячные (полумесечные и квазинедельные) изменения температуры могут быть связаны с лунно-солнечными приливами. Поэтому ежедневные аномалии температуры сглаживались путем вычисления их скользящих средних за 27 суток значений. Они изображены на рис. 1 жирной кривой. Видно, что сглаженная кривая выписывает отчетливую волну с минимумами в ноябре 2016 г. и мае-июне 2017 г. и максимумами в марте и сентябре 2017 г. Размах колебания аномалий температуры достигает 10 градусов, а период (интервал времени между одноименными экстремумами) около 204 суток. Этот период практически совпадает с 206-суточным периодом, полученным нами ранее при вычислении периодограммы 43-летнего ряда аномалий температуры г. Москвы [3, 9, 10].

Опыт показывает, что радиус корреляции аномалий температуры на ЕТР составляет свыше 1000 км. Поэтому график хода аномалий температуры в Москве удовлетворительно характеризует сглаженные изменения аномалий температуры на всей ЕТР. Однако оппоненты скептически относятся к этому положению. Поэтому мы построили графики, аналогичные рис. 1, дополнительно для станций Краснодар (рис. 2), Ростов-на-Дону (рис. 3), Самара (рис. 4) и Казань (рис. 5). Они оказались различными только по величине и срокам суточных флуктуаций, но очень схожими друг с другом по ходу скользящих средних за 27 суток аномалий температуры (рис. 6).

Видно, что аномалии температуры всех станций следуют за изменениями перигейного расстояния Луны. Лишь в сентябре-октябре 2017 г. наметилась тенденция более быстрого похолодания. Хотя во время максимума перигейного расстояния 13 сентября 2017 г., как и ранее (3 марта 2017 г. и 27 июля 2016 г.), были побиты рекорды максимальной температуры во многих городах ЕТР.

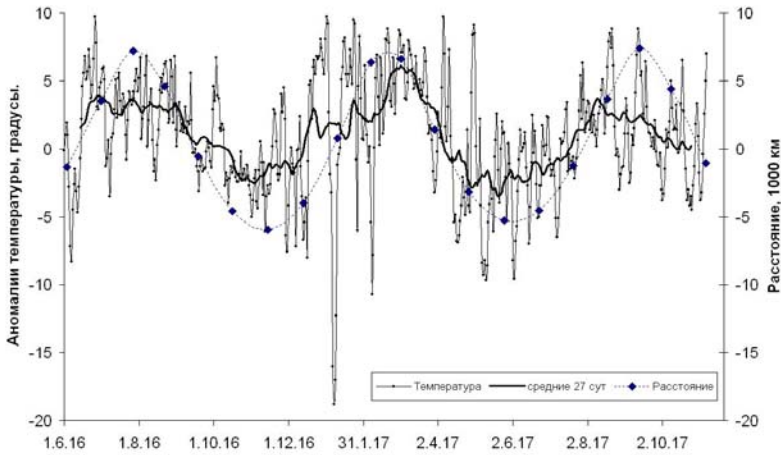


Рис. 1. Отклонение перигейного расстояния Луны от 362464 км (ромбики) и ход аномалий среднесуточной температуры воздуха в Москве в 2016–2017 гг. (тонкая кривая – среднесуточные значения, жирная кривая – скользящие средние за 27 суток значения).

Fig. 1. Deviation of the lunar perigee distance from 362464 km (diamonds) and the anomalies of daily mean air temperature in Moscow over 2016–2017 (the thin curve depicts daily mean values, and the bold curve shows 27-day moving averages).

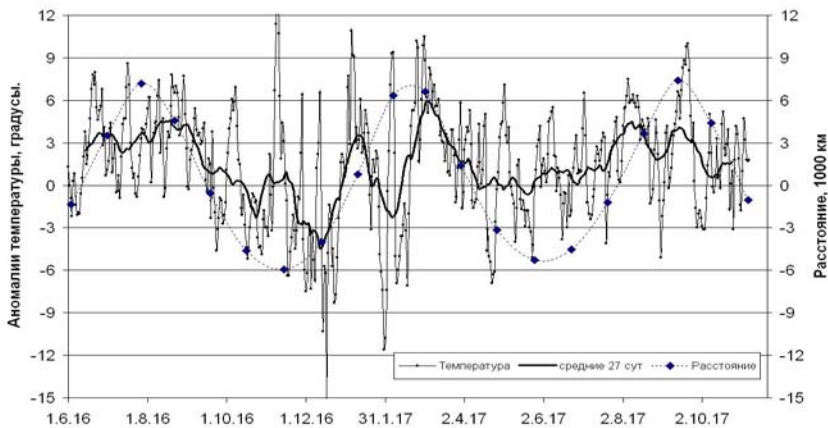


Рис. 2. Отклонение перигейного расстояния Луны от 362464 км (ромбики) и ход аномалий среднесуточной температуры воздуха в Краснодаре в 2016–2017 гг. (тонкая кривая – среднесуточные значения, жирная кривая – скользящие средние за 27 суток значения).

Fig. 2. Deviation of the lunar perigee distance from 362464 km (diamonds) and the anomalies of daily mean air temperature in Krasnodar over 2016–2017 (the thin curve depicts daily mean values, and the bold curve shows 27 day moving averages).

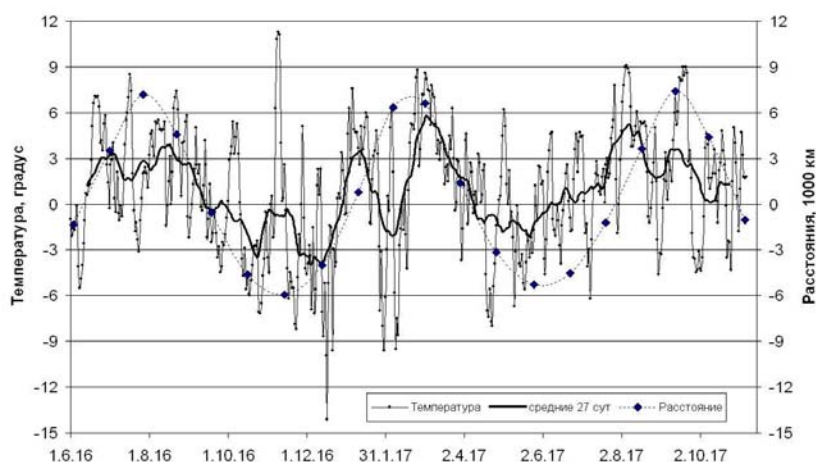


Рис. 3. Отклонение перигейного расстояния Луны от 362464 км (ромбики) и ход аномалий среднесуточной температуры воздуха в Ростове на Дону в 2016–2017 г. (тонкая кривая – среднесуточные значения, жирная кривая – скользящие средние за 27 суток значения).

Fig. 3. Deviation of the lunar perigee distance from 362464 km (diamonds) and the anomalies of daily mean air temperature in Rostov on Don over 2016–2017 (the thin curve depicts daily mean values, and the bold curve shows 27-day moving averages).

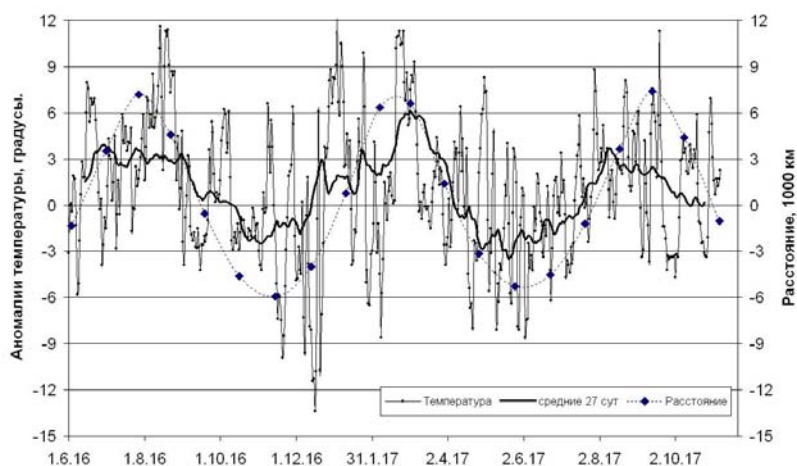


Рис. 4. Отклонение перигейного расстояния Луны от 362464 км (ромбики) и ход аномалий среднесуточной температуры воздуха в Самаре в 2016–2017 гг. (тонкая кривая – среднесуточные значения, жирная кривая – скользящие средние за 27 суток значения).

Fig. 4. Deviation of the lunar perigee distance from 362464 km (diamonds) and the anomalies of daily mean air temperature in Samara over 2016–2017 (the thin curve depicts daily mean values, and the bold curve shows 27-day moving averages).

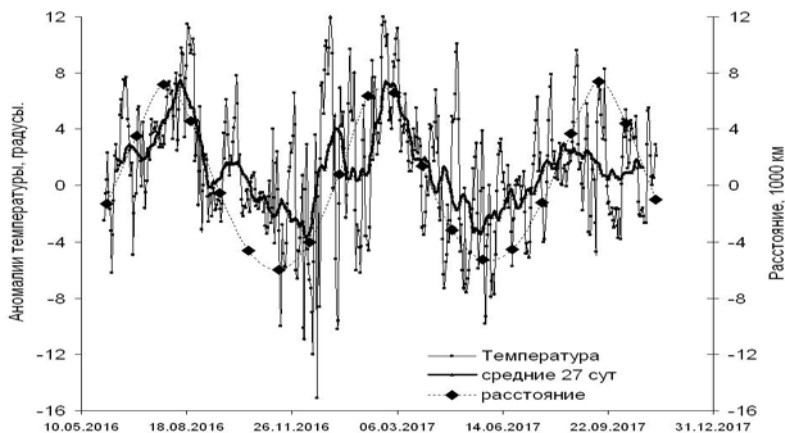


Рис. 5. Отклонение перигейного расстояния Луны от 362464 км (ромбики) и ход аномалий среднесуточной температуры воздуха в Казани в 2016–2017 гг. (тонкая кривая – среднесуточные значения, жирная кривая – скользящие средние за 27 суток значения).

Fig. 5. Deviation of the lunar perigee distance from 362464 km (diamonds) and the anomalies of daily mean air temperature in Kazan over 2016–2017 (the thin curve depicts daily mean values, and the bold curve shows 27-day moving averages).

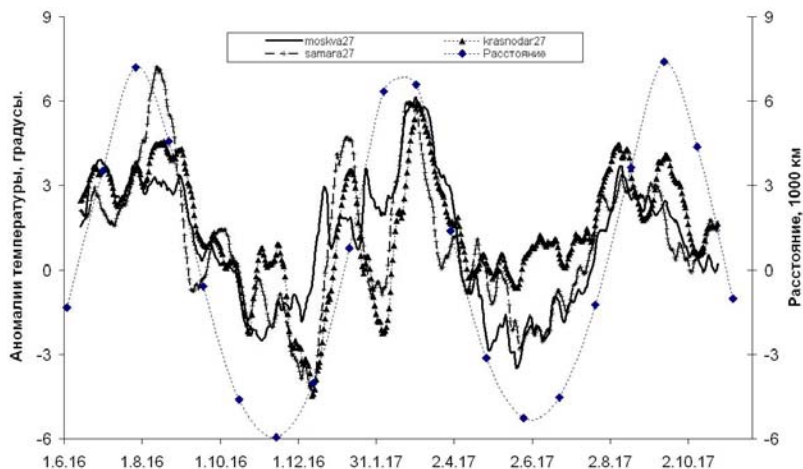


Рис. 6. Ход скользящих средних за 27 суток аномалий температуры в Москве (сплошная), в Краснодаре (треугольники), в Самаре (+) в сравнении с перигейным расстоянием Луны (ромбики, соединенные пунктирной линией).

Fig. 6. The 27-day moving averages of temperature anomalies in Moscow (solid), Krasnodar (triangles), and Samara (crosses) in comparison with the lunar perigee distance (diamonds connected by the dashed curve).

2. Природа 206-суточного лунного цикла

Новолуния и полнолуния имеют единое название – сизигия. Во время сизигии Солнце Земля и Луна находятся на одной прямой линии. В это время их приливные силы складываются и, поэтому сизигийный прилив имеет максимальную величину. В моменты квадратур (наступления первой или третьей четверти), когда направление на Луну составляет прямой угол с направлением на Солнце, приливы имеют минимальную величину. Если бы орбита Луны была правильной окружностью, то сизигийные и квадратурные приливы не изменялись во времени. Однако орбита Луны эллиптическая. По удаленности к Земле она имеет ближайшую точку – перигей и самую удаленную точку – апогей. Линия, проходящая через перигей и апогей, называется линией апсид. Естественно, приливная сила Луны на Земле в перигее максимальна, а через полмесяца в апогее – минимальна.

Перигейный конец линии апсид лунной орбиты непрерывно перемещается по небесной сфере с запада на восток, возвращаясь примерно к тому же самому положению относительно звезд через каждые 8,85 лет. Солнце совершает оборот по созвездиям зодиака в том же направлении за 1 год. Поэтому если перигейный конец линии апсид стартует в момент, когда он повернут к Солнцу, то потребуются еще 411,8 дней, или 1,127 года, чтобы он снова вернулся в исходную конфигурацию (Солнце догонит перигей). Это верно, потому что частоты двух рассматриваемых обращений вычитаются:

$$\frac{1}{1} - \frac{1}{8.85} = \frac{1}{1.127}$$

Цикл 411,8 суток называется главным лунным циклом. Понятно, что примерно через 206 суток перигейный конец лунной орбиты сделает половину оборота. Цикл 206 суток известен в астрономии как половина главного лунного цикла. С физической точки зрения цикл 412 суток – это период биений близких частот аномалистического (27,55 суток) и синодического (29,53 суток) месяцев [3, 9, 10], либо синодического месяца и периода эвекции (отклонения) в долготе Луны (31,81 суток). Цикл 206 суток – это период биений аномалистического и синодического полу-месяцев. Дело в том, что частота биений равна половине разности частот складываемых колебаний, семь синодических месяцев делятся 206,7 суток.

3. Проявление в земных процессах

Описанная цикличность взаимных конфигураций двух орбит воздействует на лунные и земные процессы. Например, расстояние между Луной и Землей при прохождении перигея изменяется от 370 000 до 356 000 км в многолетнем среднем с периодом примерно 206 суток. Этот феномен иллюстрируют рис. 1–6, где ромбиками нанесены отклонения перигейных расстояний от их среднего значения 362464 км, а их

динамика изображена пунктирной кривой. Продолжительность лунного аномалистического месяца (то есть промежутка времени между двумя последовательными прохождением Луны через перигей) тоже изменяется от 28,5 до 24,8 суток, только при многолетнем осреднении длительность аномалистического месяца равна 27,554545 дней.

Земля в своем движении вокруг барицентра системы Земля+Луна отражает все движения Луны в масштабе 1:81. Поэтому Земля имеет аналогичные вариации перицентрального расстояния и угловой скорости месячного обращения вокруг барицентра с периодом 206 суток [3, 9, 10]. Однако мы находимся на Земле и поэтому не видим и не ощущаем ее движения и вынуждены использовать Луну для исследования движений Земли.

4. Сизигийные приливы

206-суточная цикличность особенностей месячного обращения Луны и Земли отражается на процессах в земных оболочках, прежде всего в атмосфере и гидросфере. Вот, например, как (по данным [8]) изменяется наибольший размах колебаний уровня моря во время сизигий (полнолуний и новолуний) в различных портах земного шара (рис. 7).

На рис. 7 видно, что все приливные кривые одинаковых фаз Луны хорошо аппроксимируются огибающей синусоидой с периодом примерно 412 суток и амплитудой прилива около 60 см. Период биений (промежуток времени между соседними узлами или пучностями) перигейно-сизигийных кривых равен 206 суток. Рис. 7 информативен как ключ к пониманию механизма формирования 206-суточного колебания аномалий температуры в атмосфере. Он наводит на мысль, что в атмосфере должны существовать колебания атмосферного давления, аналогичные перигейно-сизигийным приливам в океане, что может привести к формированию 206-суточных колебаний температуры воздуха. В частности, на рис. 7 видно, что в периоды пучностей сизигийные приливы в полнолуния и новолуния имеют противоположные фазы. Вблизи узлов сизигийные приливы в моменты полнолуний и новолуний практически одинаковые. При подобном поведении атмосферного давления это может означать, что в периоды пучностей сизигийных приливов преобладает чередование полумесячных циклонических и антициклонических процессов, а вблизи узлов – их замирание. Такая динамика атмосферных процессов может привести к значительному отличию формирования температурного режима воздуха во время «пучностей» от режима формирования «вблизи узлов». Период этих различий и будет 206 суток.

Главная особенность перигейно-сизигийных приливов состоит в том, что кривая для каждой сизигии хорошо аппроксимируется синусоидой (огибающей биения) с периодом 412 суток, а их фазы отличаются на 180° (рис. 7). Поэтому для любой приливной характеристики каждой положительной аномалии при одной сизигии соответствует отрицательная аномалия при ближайшей другой сизигии.

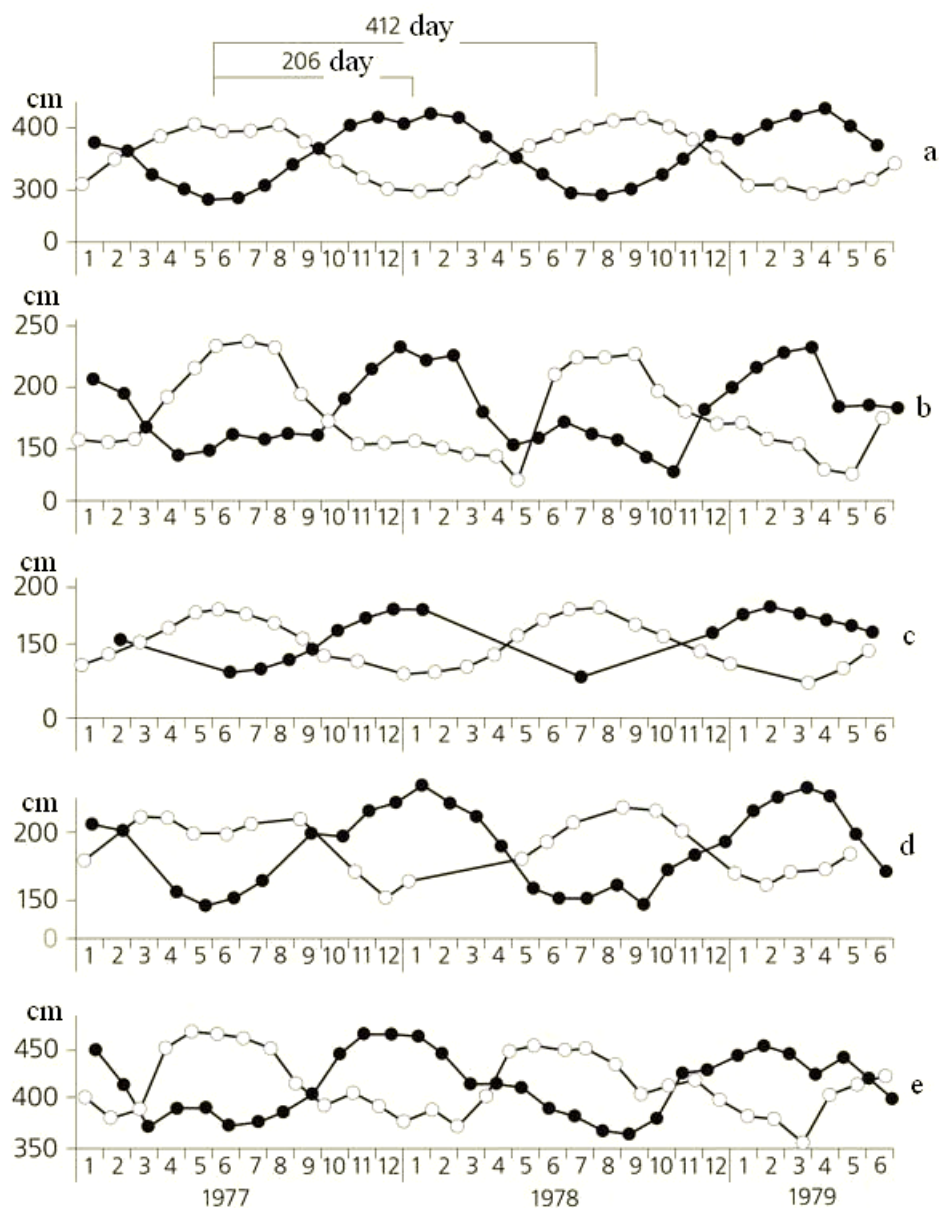


Рис. 7. Размах наибольшего сизигийного прилива в моменты полнолуний (○) и новолуний (●) в Мурманске (а), Puerto Williams (Чили), (б), Suva (Фиджи) (с), Lerwick (Шотландия) (д) и Магадан (е) [8].

Fig. 7. Highest spring tide at full moons (○) and new moons (●) in Murmansk (a), Puerto Williams (Chile) (b), Suva (Fiji) (c), Lerwick (Scotland) (d), Magadan (e) [8].

Вблизи узлов сизигийные приливы в моменты полнолуний и новолуний практически одинаковые. При подобном поведении атмосферного давления это может означать, что в периоды пучностей сизигийных приливов преобладает чередование полумесячных циклонических и антициклонических процессов, а вблизи узлов – их замирание. Такая динамика атмосферных процессов может привести к значительному отличию формирования температурного режима воздуха во время «пучностей» от режима формирования «вблизи узлов». Период этих различий и будет 206 суток.

5. Сизигийные приливы в атмосфере

Появление 206-суточного цикла в погоде 2017 года стимулировало нас исследовать сизигийные приливы в атмосфере, которые должны проявиться в колебаниях атмосферного давления, подобно сизигийным колебаниям уровня моря на рис. 7 [8]. Мы воспользовались рядом ежедневных восьмисрочных наблюдений приземного атмосферного давления метеостанции ВДНХ ($55,83^{\circ}$ с. ш., $37,62^{\circ}$ в. д., 156 м над уровнем моря) в Москве за последние два года. Были вычислены среднесуточные значения давления и их аномалии. В качестве норм использовались средние за 1966–2010 гг. ежесуточные значения давления для метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова [5].

Далее для каждого дня полнолуния выбиралась среднесуточная аномалия давления за этот день. Отдельно аналогичным путем сформирован ряд аномалий атмосферного давления для всех дней с новолунием. Построен график аномалий атмосферного давления на метеостанции ВДНХ в дни полнолуний (белые кружки на пунктирной кривой) и в дни новолуний (черные кружки на сплошной кривой) за 2016–2018 годы (рис. 8).

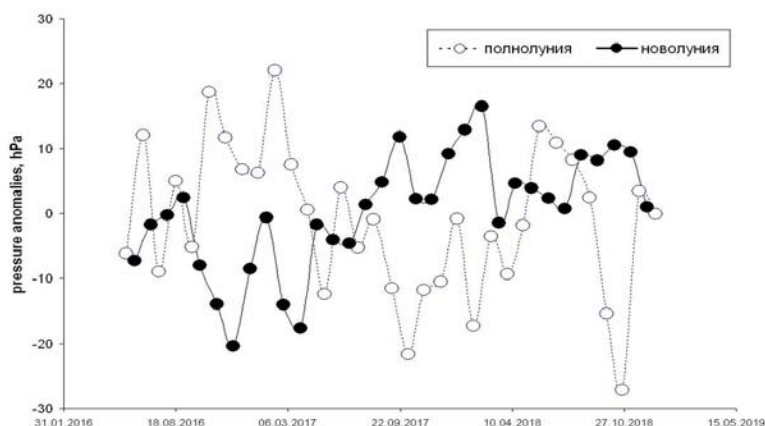


Рис. 8. Сизигийные колебания атмосферного давления на метеостанции ВДНХ в 2016–2018 гг.

Fig. 8. Spring oscillations of atmospheric pressure at the VDNKh (Moscow) weather station over 2016–2018.

Для ответа на возражения оппонентов мы проанализировали сизигийные приливы еще и в Казани. Мы воспользовались рядом ежедневных среднесуточных значений приземного атмосферного давления P метеостанции Казанского университета за 2016–2018 гг. Не имея информации о среднесуточных нормах давления (для исключения годового хода P , обусловленного сезонными изменениями температуры), мы вычислили ряд скользящих средних за 206 суток ежедневных значений давления $\bar{P}$. Далее вычислялись отклонения (разности) исходных значений давления от их 206-суточных средних:

$$P' = P - \bar{P}$$

где P – наблюдаемое давление; P' – отклонения давления от $\bar{P}$;

$$\bar{P}_{i+103} = \frac{1}{206} \sum_{k=1}^{206} P_k.$$

Затем для каждого полнолуния (в интервале ± 3 дня) выбиралось отклонение давления P' . Отдельно аналогичным путем сформирован ряд отклонений атмосферного давления P' для всех дней с новолунием. В одном случае (25 октября 2017 г.) учтена задержка новолунного антициклона на 5 дней.

Построен график отклонений атмосферного давления P' на метеостанции Казанского университета в дни полнолуний (белые кружки на пунктирной кривой) и в дни новолуний (черные кружки на сплошной кривой) за 2016–2017 гг. (рис. 9).

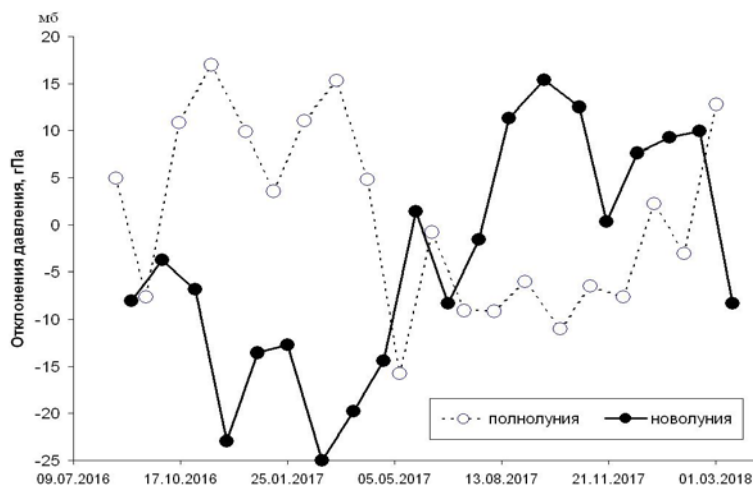


Рис. 9. Сизигийные колебания атмосферного давления на метеостанции Казань в 2016–2017 гг.

Fig. 9. Spring oscillations of atmospheric pressure at Kazan weather station over 2016–2017.

На рис. 8 и 9 можно видеть, что сизигийные колебания атмосферного давления сильно зашумлены по сравнению с аналогичными колебаниями уровня моря (рис. 7). Но основные закономерности сизигийных приливов: узлы (летом 2016 г. и в мае 2017 г.), а также пучности (в феврале-марте и сентябре-октябре 2017 г.) прослеживаются. Хорошо видна разнотечность аномалий давления для новолуний и полнолуний. Аномалии давления в полнолуния и новолуния можно аппроксимировать синусоидами с периодами огибающих биения около 412 суток и противоположными фазами. Размах колебаний в пучностях достигает 40 мб, что по порядку величины сопоставимо с реальными синоптическими колебаниями атмосферного давления и близко к сизигийным приливам в океанах [8]: при погружении в океан на 1 см происходит изменение давления, соответствующее изменению атмосферного давления на 1 гПа.

Таким образом, рис. 8 и 9 свидетельствуют о том, что в 2016–2017 гг. геодинамическим силам удалось перебороть стохастическую термодинамику атмосферы и навязать ей свой небесно-механический, приливный ритм эволюции погоды на ЕТР. В результате таких случаев вынужденной синхронизации динамики атмосферы с приливами и появляются лунные составляющие в спектрах аномалий метеорологических характеристик [3, 9, 10].

6. Нарушение сезонного хода погоды

Яркий случай проявления 206-суточного лунного цикла в погоде 2016–2017 гг. на ЕТР был связан с сизигийными приливами в атмосфере. 206-суточный цикл сизигийных приливов нарушил правильный сезонный ход метеорологических характеристик. С ним в 2016–2017 гг. были связаны многие локальные рекорды суточных значений метеорологических характеристик на Европейской территории России.

206-суточный цикл аномалий температуры приводит к нарушению сезонного хода температуры. Так, например, на ЕТР в 2016 г. из-за этого цикла зима наступила почти на месяц раньше, а лето 2017 г. – на месяц позже обычных сроков. За этим последовал сдвиг лета на август и задержка в наступлении осени. В январе 2018 г. фазы 206-суточного лунного и годового солнечного циклов совпали, и зима, хоть и мягкая и малоснежная вначале, но многоснежная и морозная в конце, состоялась.

На рассмотренном интервале времени совпали два экстремума (максимумы или минимумы) перигейного расстояния и температуры на ЕТР. Вырисовывается интересная зависимость: тяга случаев с рекордной максимальной температурой к максимумам перигейного расстояния, а случаев минимальной температуры – к его минимумам. Так, по данным ежедневного Гидрометеорологического бюллетеня Гидрометцентра России, вблизи максимума перигейного расстояния 1 марта 2017 г. были побиты абсолютные максимумы температуры в Москве, Санкт-Петербурге, Брянске, Ростове-на-Дону, Кирове и ряде других городов.

Около последующего максимума расстояния (13 сентября) температура снова превысила установленные ранее для 12 сентября значения максимальной температуры в Великих Луках, Смоленске, Твери, Рыбинске, Симферополе, Анапе, Краснодаре и др. Случаи обновления абсолютных минимумов температуры происходят значительно реже: вероятно, вследствие глобального потепления климата. Около минимума расстояния 26 мая – 20 июня 2017 г. отмечались заморозки на ЕТР и обновились рекорды минимальной температуры в Архангельске, Липецке, Пскове, Тамбове, Уфе и др.

Неверно полагать, что корреляция перигейного расстояния Луны с аномалиями температуры, представленная на рис. 1 и 2, может существовать непрерывно. Дело в том, что Луна бывает в перигее чаще, чем происходят смены ее одноименных фаз. 15 аномалистических месяцев (413,3182 суток) длятся столько же, сколько 14 синодических месяцев (413,4282 суток). За 15 аномалистических месяцев наблюдаются две смены перигейного расстояния от 356 500 до 370 000 км. Одна смена осуществляется за 7 аномалистических месяцев (192,8 суток), а вторая – за 8 мес. (220,4 суток). Наблюдается своего рода частотная модуляция изменения перигейного расстояния, которая сильно усложняет синхронизацию атмосферных процессов с лунно-солнечными приливами.

Анализ изменения аномалий температуры за длительный период времени показывает, что описанный случай есть сравнительно редкий эпизод синхронизации колебаний атмосферной циркуляции с колебаниями геодинатических сил в системе Земля – Луна – Солнце. Анализ атмосферного давления в Москве за период с 1966 г. показал, что близкие к рассмотренной выше синхронизации колебаний давления с перигейно-сизигийными приливами случаи отмечались в 1978, 1980, 1982 и 1983 гг. Некоторые примеры синхронизации атмосферных процессов с геодинатическими силами приведены в работах [4, 9, 10, 11].

Все выше перечисленные метеорологические особенности возникают вследствие воздействия перигейно-сизигийных приливов на атмосферу. Понятно, что возможность синхронизации зависит от сезона года. 206-суточный цикл кратен четырем годам в отношении 1:7. Через четыре года фаза 206-суточного цикла становится близкой к исходному сезону года.

На первый взгляд, максимальная корреляция аномалий температуры с перигейным расстоянием Луны должна была бы иметь четырехлетнюю цикличность. Однако оказалось, что корреляция тяготеет к восьмилетнему циклу. Через четыре года фазы Луны изменяются на противоположные (вместо новолуний наблюдаются полнолуния). Напомним, что при новолунии Луна находится между Солнцем и Землей, а при полнолунии между Солнцем и Луной оказывается Земля. В этих случаях конфигурация гравитационных сил совершенно разная. Только через восемь лет повторяются и сезоны года, и одноименные фазы Луны. То есть 206-суточный цикл в изменениях аномалий температуры и особенностей

погоды проявляется преимущественно при повторении взаимных конфигураций между Землей, Луной и Солнцем.

Хорошим примером восьмилетней цикличности может служить еще многими не забытая, необычно сухая и теплая осень на ЕТР в 2018 году. Ранее похожие осенние аномалии погоды отмечались в 2010, 2002, 1994 гг. Еще в более далеком прошлом упоминаются такие же сухие осенние аномалии в 1954, 1946, 1938 годах.

Заключение

Сложение лунных аномалистического и синодического полумесяцев порождает биение приливной силы с периодом 206 суток. Этот приливный цикл влияет на развитие синоптических процессов, как установлено выше: проявляется в колебаниях атмосферного давления, температуры и погоды на Европейской территории России. 206-суточный цикл не кратен годовому циклу 365 суток, поэтому он нарушает правильный сезонный ход погоды, приводя к значительным аномалиям метеорологических показателей. Непрерывный мониторинг аномалий атмосферного давления в моменты новолуний и полнолуний открывает потенциальные возможности экстраполировать ход перигейно-сизигийных колебаний давления, а значит и прогнозировать развитие соответствующих им погодных процессов на несколько месяцев вперед. Нужны дальнейшие исследования территориального и временного проявления перигейно-сизигийных приливов в изменениях погоды и климата Земли.

Список литературы

1. Багров А.Н., Локтионова Е.А. Новая технология подготовки исходной информации для долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. 1994. № 11. С. 100-109.
2. Гордин В.А. Об обратной интерполяции осредненных значений применительно к климатической информации // Метеорология и гидрология. 1994. № 11. С. 110-114.
3. Сидоренков Н.С. Небесно-механические причины изменений погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Том 14, № 3. С. 5-26.
4. Сидоренков Н.С. О синхронизации атмосферных процессов с частотами системы Земля-Луна-Солнце // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 33-47.
5. Сидоренков Н.С., Исаев А.А., Орлов И.А., Шерстюков Б.Г. Тонкая структура временных вариаций атмосферного давления // Труды Гидрометцентра России. 2008. Вып. 342. С. 177-186.
6. Сидоренков Н.С., Сумерова К.А. Биения колебаний температуры как причина аномально жаркого лета 2010 г. на Европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 81-94.
7. Чепмен С., Линдзен З. Атмосферные приливы: термические и гравитационные. М.: Мир, 1972. 295 с.
8. Avsuk Yu.N., Maslov L.A. Long period tidal force variations and regularities in orbital motion of the Earth-Moon binary planet system // Earth, Moon, and Planets. 2011. Vol. 108, is. 1. P. 77-85. DOI 10.1007/s11038-011-9381-8.
9. Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. 317 p.
10. Sidorenkov N.S. Celestial mechanical causes of weather and climate change // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52, no. 7. P. 667-682. DOI: 10.1134/S0001433816070094.

11. Sidorenkov N.S. Synchronization of terrestrial processes with frequencies of the Earth-Moon-Sun system // *Astronomical and Astrophysical Transactions (AApTr)*. 2018. Vol. 30, is. 2. P. 249-260.

12. Volland H. Atmospheric tidal and planetary waves. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988. 348 p.

References

1. Bagrov A.N., Loktionova E.A. Novaya tekhnologiya podgotovki iskhodnoy informacii dlya dolgosrochnykh prognozov pogody. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1994, no. 11, pp. 100-109 [in Russ.].

2. Gordin V.A. Ob obratnoy interpol'atsii osrednennykh znacheniy primenitel'no k klimaticheskoy informacii. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1994, no. 11, pp. 110-114 [in Russ.].

3. Sidorenkov N.S. Celestial-mechanical factors of the weather and climate change. *Gelio-geofizicheskie issledovaniya [Heliogeophysical Research]*, 2015, vol. 14, no. 3, pp. 5-26 [in Russ.].

4. Sidorenkov N.S. Synchronization of atmospheric processes with frequencies of the Earth – Moon – Sun system. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 359, pp. 33-47 [in Russ.].

5. Sidorenkov N.S. Isaev A.A., Orlov I.A., SHerstyukov B.G. Tonkaya struktura vremennykh variatsiy atmosfernogo davleniya. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 342, pp. 177-186 [in Russ.].

6. Sidorenkov N.S., Sumerova K.A. Temperature fluctuation beats as a reason for the anomalously hot summer of 2010 in the European part of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 6, pp. 411–420. DOI: 10.3103/S106837391206009X.

7. Chepmen S., Lindzen Z. Atmosferye prilivy: termicheskie i gravitacionnye. Moscow, Mir publ., 1972, 295 p. [in Russ.].

8. Avsuk Yu.N., Maslov L.A. Long period tidal force variations and regularities in orbital motion of the Earth-Moon binary planet system. *Earth, Moon, and Planets*, 2011, vol. 108, no. 1, pp. 77-85. DOI: 10.1007/s11038-011-9381-8.

9. Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, 317 p.

10. Sidorenkov N.S. Celestial mechanical causes of weather and climate change. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2016, Vol. 52, no. 7, pp. 667-682. DOI: 10.1134/S0001433816070094.

11. Sidorenkov N.S. Synchronization of terrestrial processes with frequencies of the Earth-Moon-Sun system. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2018, vol. 30, no. 2, pp. 249-260. DOI: 10.17184/eac.2034.

12. Volland H. Atmospheric tidal and planetary waves. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988, 348 p.

Поступила в редакцию 16.10.2019 г.

Received by the editor 16.10.2019.

УДК 551.5

О результатах восемнадцатой сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-18)

***В.М. Хан, Р.М. Вильфанд, В.А. Тищенко,
Е.С. Каверина, К.А. Сумерова, И.А. Куликова, Е.Н. Круглова***

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

Приводятся основные результаты обобщенного анализа особенностей крупномасштабной атмосферной циркуляции в Северном полушарии за зиму 2019/2020 гг.; обсуждается успешность консенсусных прогнозов температуры воздуха и осадков, составленных в ходе работы предыдущей сессии СЕАКОФ-17, с представлением оценок качества прогнозов по территории северной Евразии и по укрупненным регионам; рассматриваются основные особенности термического состояния океана и крупномасштабной циркуляции атмосферы на предстоящее лето 2020 г.; формулируется прогноз аномалий приземной температуры воздуха и осадков на лето 2020 г., согласованный с экспертами, принявшими участие в СЕАКОФ-18.

Ключевые слова: консенсусный прогноз, температура воздуха, осадки, крупномасштабная атмосферная циркуляция, гидродинамические модели, температура поверхности океана

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-141-152>

On the results of the Eighteenth Session of the North Eurasian Climate Forum (NEACOF-18)

***V.M. Khan, R.M. Vilfand, V.A. Tischenko,
E.S. Kaverina, K.A. Sumerova, I.A. Kulikova, E.N. Kruglova***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
khan@mecom.ru*

The main results of the analysis of large-scale atmospheric circulation in the Northern Hemisphere for the last winter of 2019/2020 are presented. The quality of consensus forecasts of air temperature and precipitation issued during the 17th session of NEACOF-17 are discussed, with the presentation of forecast skill scores calculated for the territory of Northern Eurasia and for enlarged regions. The main features of the thermal state of the ocean and large-scale atmospheric circulation for the coming summer of 2020 are analyzed. The forecast of surface air temperature and precipitation anomalies for the upcoming summer of 2020 is formulated in agreement with the experts who participated in NEACOF-18.

Keywords: consensus forecast, air temperature, precipitation, large-scale atmospheric circulation, hydrodynamic models, sea surface temperature

Введение

В настоящее время Региональные климатические форумы по сезонным прогнозам (РКОФ) функционируют во всех региональных ассоциациях Всемирной Метеорологической Организации (ВМО), получив широкое признание в качестве эффективного механизма для разработки климатических информационных продуктов [12], ориентированных на пользователя, и для доведения этой информации до конечных потребителей в наиболее значимых социально-экономических секторах. Платформы РКОФ объединяют на региональном уровне национальных и международных экспертов по климату, отраслевых пользователей и представителей заинтересованных сторон для обсуждения целого ряда вопросов, связанных с научно-оперативными задачами по прогнозированию климатической изменчивости на сезонных масштабах времени [13, 14].

С момента создания РКОФ ВМО активно поддерживает их деятельность и проводит периодическую экспертизу работы с целью дальнейшего усовершенствования и стандартизации методологии составления сезонных прогнозов.

Выполняя международные обязательства регионального центра ВМО по климатическому обслуживанию на территории северной Евразии, Северо-Евразийский климатический центр, СЕАКЦ [8], провел в онлайн-режиме 18-ю сессию Северо-Евразийского климатического форума СЕАКОФ-18 [9] на базе ФГБУ «Гидрометцентр России» в период с 19 по 20 мая 2020 года.

Первый день работы СЕАКОФ-18 проходил в форме обучающего семинара, на котором были представлены доклады ведущих специалистов СЕАКЦ с последующими дискуссиями по вопросам развития методов и технологий климатического прогнозирования, оценок и предсказуемости атмосферной изменчивости, практического использования прогностической информации.

Во второй день СЕАКОФ-18 обсуждались данные климатического мониторинга и сезонного прогнозирования по результатам анализа и оценок метеослужб стран СНГ и дальнего зарубежья с основной целью – составления консенсусного прогноза приземной температуры воздуха и осадков на предстоящий летний сезон 2020 года по территории Северной Евразии.

В работе СЕАКОФ-18 приняли участие представители Секретариата ВМО, специалисты из ФГБУ «Гидрометцентр России», ФГБУ «Главная Геофизическая Обсерватория им. А.И. Воейкова», ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Института повышения квалификации Росгидромета, метеослужб Армении, Беларуси, Казахстана, Киргизии, Молдавии, России и Узбекистана.

В следующих разделах статьи по итогам работы СЕАКОФ-18 приводятся основные результаты обобщенного анализа особенностей

крупномасштабной атмосферной циркуляции в Северном полушарии за прошлую зиму 2019/2020 гг., рассматривается успешность консенсусных прогнозов температуры воздуха и осадков, составленных в ходе работы предыдущей сессии СЕАКОФ-17, обсуждаются основные особенности термического состояния океана и крупномасштабной циркуляции атмосферы на предстоящее лето, приводится формулировка прогноза аномалий приземной температуры воздуха и осадков на лето 2020 г. по согласованию с экспертами, принявшими участие в форуме. Полная информация по СЕАКОФ-18 доступна на сайте СЕАКЦ (<http://seakc.meteoinfo.ru/-neacof/362-neacof18>).

Основные особенности атмосферной циркуляции в Северном полушарии зимой 2019/2020 гг.

Зимний сезон 2019/2020 гг. был отмечен следующими особенностями атмосферной циркуляции.

В стратосфере доминировал глубокий устойчивый циркумполярный вихрь с центром в районе архипелага Земля Франца-Иосифа и значениями геопотенциала в центре значительно ниже средних многолетних (аномалии около – 90 дам). Циклон был устойчивым и холодным до стратосферного потепления в марте. Сложившиеся условия привели к формированию полярных стратосферных облаков и к рекордному с 2011 года истощению озонового слоя в Арктике. Стратосферные антициклоны над севером Тихого океана были мощными, нередко в течение сезона их влияние распространялось на западные и центральные области США и Канады, что привело к формированию зоны положительных аномалий геопотенциала с максимальными значениями над центральной частью Канады до +38 дам (рис. 1а).

В течение всего зимнего сезона сохранялась положительная фаза индекса NAO, а в январе и феврале положительные значения индекса АО были аномально высокими. Над территорией Северной Евразии преобладали зональные атмосферные процессы. Околополярный циклон расщепился на две области пониженного давления: первая располагалась в канадском секторе Арктики – море Баффина, вторая сформировалась над архипелагом Земля Франца-Иосифа. Под действием барической ложбины находились ЕТР, Урал и север Западной Сибири, над севером Тихого океана ложбина была немного смещена на восток и располагалась над Аляской (аномалии – 7 дам). Под влиянием мощных тропосферных гребней оказались юго-западная часть Европы, Западная и Центральная части Сибири и север Тихого океана (гребень над Чукоткой) (рис. 1б). С конца декабря по конец января над Европой и ЕТР влияние тропосферных гребней было определяющим, в середине января отмечались наиболее сильные процессы блокирования; в феврале блокирование уже наблюдалось в Сибири, а в середине месяца – и над ЕТР (рис. 1в).

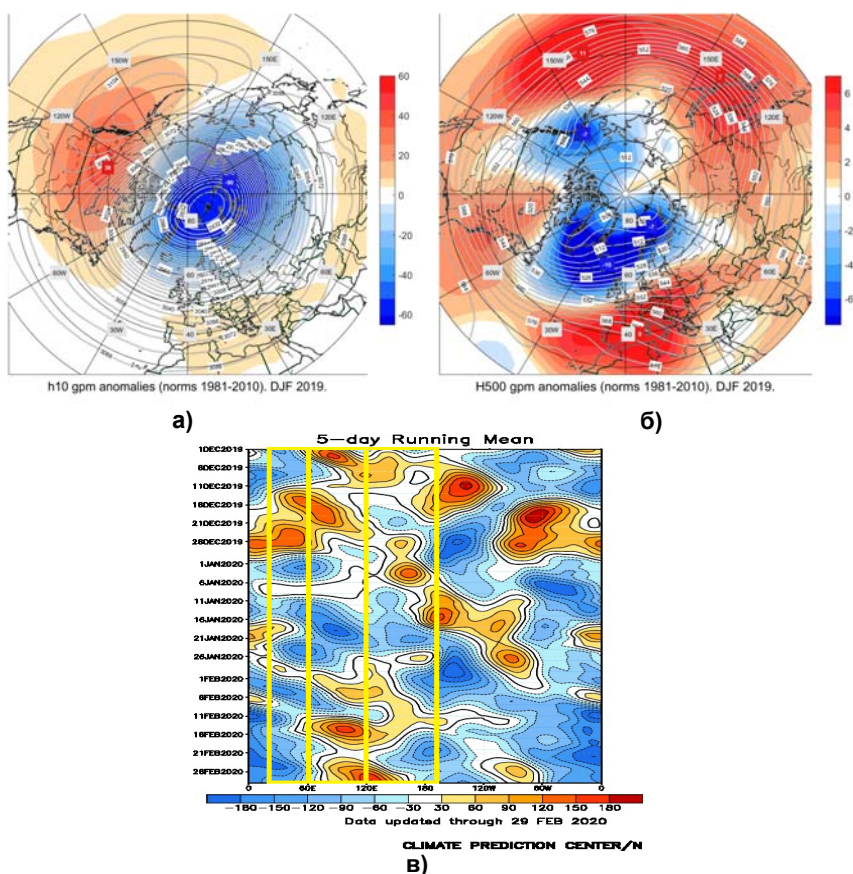


Рис. 1. Карты аномалий относительно климатических норм за период 1981–2010 гг. и значений геопотенциала по данным NCEP/NCAR реанализа: на поверхности Н-10 (а); Н-500 (б) (источник: СЕАКЦ); долго-временные диаграммы аномалий геопотенциала с использованием скользящего среднего окна по 5 суткам (1981–2010 гг.) за зимний сезон для широтной секции 60–90° с. ш. (источник: CPC NOAA) (в).

Fig. 1. Mean and anomalous (reference period 1981-2010) values of geopotential height based on NCEP/NCAR reanalysis: at H-10 hPa (a); at H-500 hPa (б) (source: NEACC) diagram of geopotential height anomalies with moving average window for 5 days (1981-2010) for the latitudinal section 60–90° N (source: CPC NOAA), DJF 2019/2020 (в).

В атлантической паре центров действия атмосферы ведущая роль в определении погодных условий принадлежала Исландскому минимуму с центром в районе Исландии. Связанная с ним глубокая ложбина занимала Восточную Европу и ЕТР с минимальными отрицательными значениями аномалий (-14 гПа) на севере Скандинавии. Вторая ложбина располагалась над Западной Сибирью. Сибирский максимум был ослаблен, охватывая несколько меньшую площадь, чем обычно, центр его

располагался над Монголией. Ослабление максимума проявилось на его западной периферии, при этом мощными оставались северо-восточные и восточные гребни сибирского антициклона (рис. 2а).

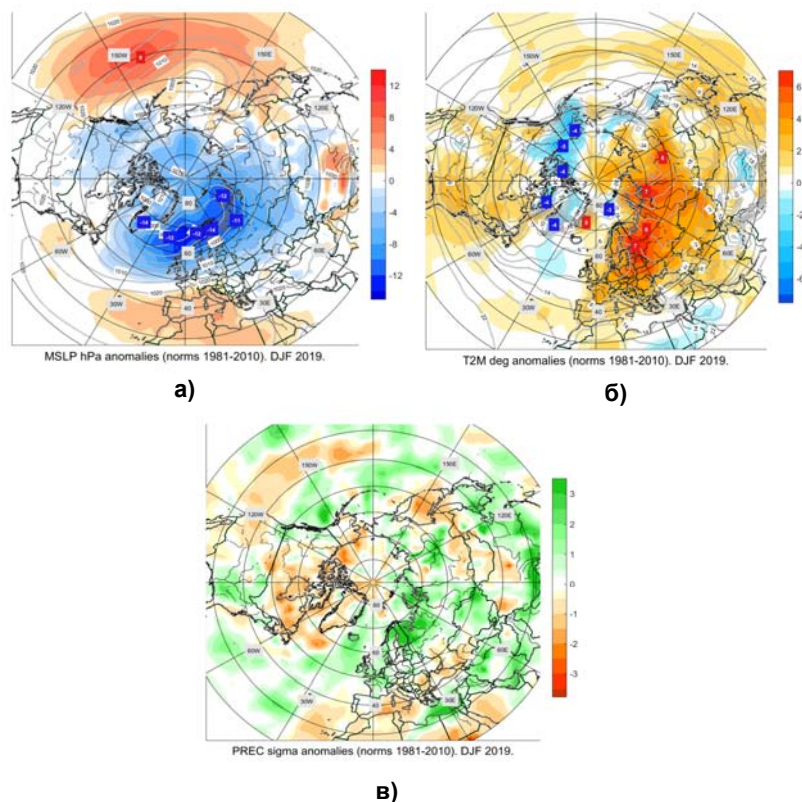


Рис. 2. Карты аномалий относительно климатических норм за период 1981-2010 гг. и абсолютных значений по данным NCEP/NCAR реанализа: приземного давления (а); приземной температуры воздуха (б); карты аномалий осадков за зимний период 2019/2020 гг. (в)
Fig. 2. Mean and anomalous values: sea surface level pressure (а); surface air temperature (б); map of precipitation anomalies. DJF 2019/2020. NCEP/NCAR reanalysis data. Anomalies are departures from the 1981-2010 base period seasonal means (в).

Практически на всей территории Евразии температурный фон оказался значительно выше нормы (положительные аномалии 4–7 °С). Только на Чукотке, в Магаданской области и Камчатском крае температура за зимний сезон оказалась близкой к норме и чуть ниже ее (рис. 2б). Наиболее обширные области положительных аномалий (7 °С) сформировались на северо-западе ЕТР и северо-западе Красноярского края. По данным Гидрометцентра России, зима 2019/2020 гг. стала самой

теплой в истории России, превысив предыдущий рекорд 2015/2016 гг. на 1,3 °С, а в целом по Северному полушарию – повторила рекорд тепла зимы 2015/2016 гг. Глубокие атлантические циклоны принесли избыток осадков в Скандинавию, на север ЕТР, север Урала и на север Западной Сибири. Дефицит осадков наблюдался на юге ЕТР и западе Казахстана. Больше нормы осадков выпало в восточной половине Казахстана, Киргизии, Туркмении. Под влиянием сибирского максимума наблюдалось аномально мало осадков на юге Восточной Сибири, Монголии и на юге Дальнего Востока России, на о. Сахалин.

Успешность прогнозов температуры воздуха и осадков за зимний сезон 2019/2020 гг.

В оперативной деятельности СЕАКЦ [1, 2] при составлении сезонных прогнозов в качестве основы используются расчеты моделей общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [7] и модели ГГО [3]. Для повышения успешности качества прогнозов разрабатываются различные статистические методы в применении к исходным гидродинамическим прогнозам, основанные на принципе MOS (Model Output Statistics) [4–6], а также в приложении к эмпирическим прогнозам [11]. С недавнего времени при составлении консенсусных прогнозов для задач СЕАКОФ в экспериментальном режиме [10] стал разрабатываться объективный подход с привлечением результатов гидродинамического моделирования не только моделей ПЛАВ и ГГО, но и других центров, например Центра климатических прогнозов США (Climate Prediction Center NOAA, CFS-2), Канадской метеослужбы (Environment and Climate Change Canada, CanCM) и Токийского климатического центра (Tokyo Climate Center, TCC). Предварительные результаты стандартизации методов консенсусных прогнозов демонстрируют их перспективность и необходимость дальнейшего развития. Ниже обсуждается качество прогноза, составленного в ходе предыдущей сессии СЕАКОФ-17.

Консенсусный прогноз верно воспроизвел основные очаги повышенной температуры воздуха над западными регионами в Северной Евразии, в южной половине Средней Азии (Туркмения, Узбекистан, Таджикистан, Киргизия, юг Казахстана), над Сибирью. Над большей территорией Европейской части России прогноз и фактическая аномалия оказались в смежных градациях (прогнозировалась градация около нормы, а фактически наблюдалась выше нормы). Отрицательные аномалии температуры воздуха на северо-востоке России прогнозом не были предсказаны (рис. 3)

В консенсусном прогнозе были верно отражены области избыточного количества осадков над западными и северо-западными регионами Северной Евразии, в Западной Сибири, на территории Якутии. Осадки выше нормы были корректно спрогнозированы в Туркмении, Таджикистане, в западной половине Киргизии, центральной части

Казахстана и Узбекистана. Дефицит осадков на юге Европейской части, юге Сибири и Дальнего востока не был воспроизведен в прогнозах (рис. 4).

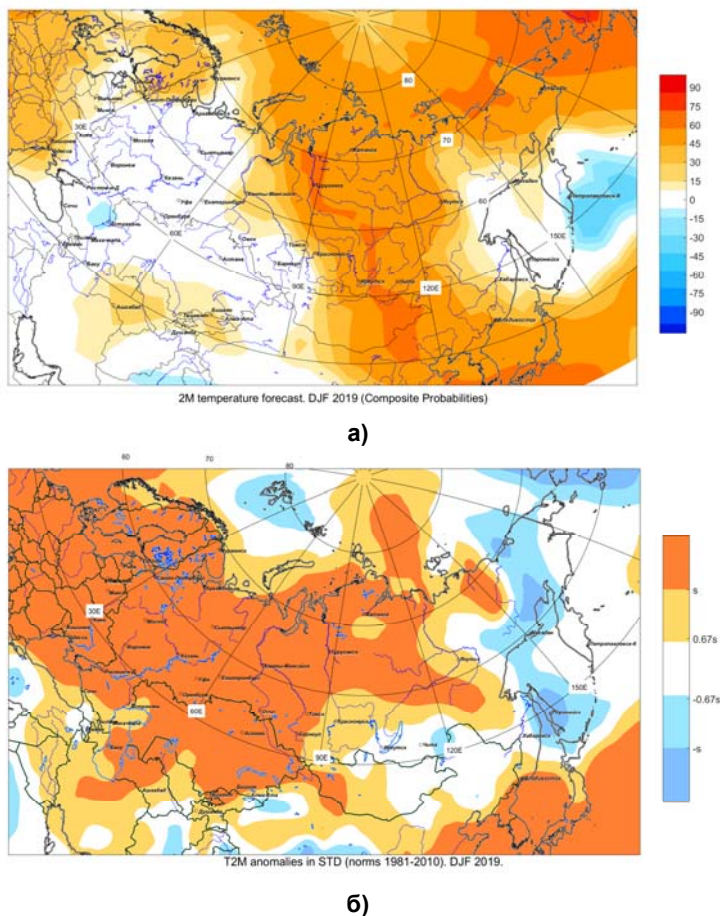


Рис. 3. Карты согласованности прогнозов аномалии приземной температуры воздуха, полученных на основе комплексации данных динамических моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2) (а); распределение аномалий приземной температуры по данным NCEP/NCAR реанализа за зимний сезон 2019/2020 гг. (б).
Fig. 3. Consistency of forecasts of surface air temperature anomalies from forecast models (SLAV, MGO, TCC, CanSIP, CFS2) (a); distribution of surface temperature anomalies based on NCEP/NCAR reanalysis data for the DJF 2019/2020 (б).

Успешность консенсусного прогноза по всей территории Северной Евразии для температуры воздуха составила 71 %, для осадков – 68 % (таблица). Наиболее высокие оценки оправдываемости прогнозов аномалии температуры воздуха (76 %) и осадков (70 %) отмечены для азиатской территории в Северной Евразии.

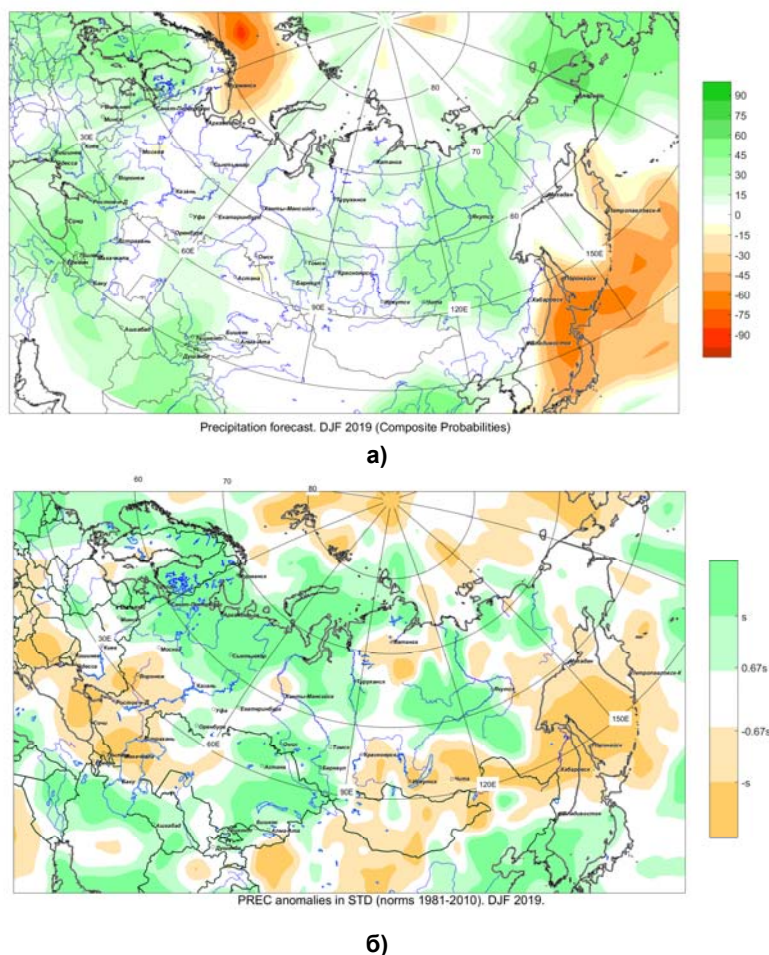


Рис. 4. Карты согласованности прогнозов аномалии осадков, полученных на основе комплексации данных динамических моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2) (а); распределение аномалий осадков по данным NCEP/NCAR реанализа за зимний сезон 2019/2020 гг. (б).

Fig. 4. Consistency of forecasts of precipitation anomalies from forecast models (PLAV, GGO, TCC, CanSIP, CFS2) (a); distribution of precipitation anomalies based on NCEP/NCAR reanalysis data for the DJF 2019/2020 (б).

Таблица. Оценки консенсусных прогнозов (%) за зимний сезон 2019/2020 гг.

Table. Skill scores in % of consensus forecasts of air temperature and precipitation for DJF 2019/2020

Оценки оправдываемости	Северная Евразия	Европейская часть	Азиатская часть	Центр. Азия и Казахстан
Приземная температура	71	65	76	67
Осадки	68	64	70	68

Консенсусный прогноз основных особенностей термического состояния океана и крупномасштабной циркуляции атмосферы на лето 2020 года

Большинство мировых прогностических центров прогнозируют значительные положительные аномалии ТПО в северной части Тихого океана, что может привести к существенному изменению положения основных центров действий атмосферы, а также траекторий движения циклонов. Слабые отрицательные аномалии ожидаются лишь в экваториальных широтах, преимущественно на востоке океана. Согласно прогнозам IRI/CPC, вероятности событий La Nina, нейтральной фазы и El Nino (Nino3.4, пороговые значения: $-0,5^{\circ}\text{C}$ и $0,5^{\circ}\text{C}$) в предстоящем летнем сезоне составляют 17 %, 66 % и 17 % соответственно.

На севере Индийского океана и прилегающих к юго-восточной Азии акваториях морей ожидаются положительные аномалии температуры. Уменьшение температурных контрастов между сушей и морем может стать причиной ослабления летнего муссона в субтропических и тропических широтах юго-восточной Азии.

В Северной Атлантике распределение прогностических аномалий ТПО соответствует отрицательной фазе триполя, связанной с отрицательной фазой NAO. Значительные положительные аномалии ТПО ожидаются на западе тропических широт.

Согласно прогнозам Гидрометцентра России, предстоящим летом ожидается преобладание режимов циркуляции, связанных с отрицательной фазой Северо-Атлантического колебания (NAO) и положительной фазой Евразийского колебания (EU). Отрицательные (положительные) значения индекса NAO (EU) ассоциируются с отрицательными (положительными) аномалиями геопотенциала на севере Европы и на северо-западе Европейской России (Сибири).

Консенсусный прогноз аномалий приземной температуры воздуха и осадков на лето 2020 года

По данным консенсусного прогноза на предстоящее лето 2020 года, в Сибири и на Дальнем Востоке, за исключением южных регионов, ожидаются значения температуры выше средних многолетних, с наиболее высокой вероятностью (более 60 %) в Западной Сибири. В то же время в южных регионах Азиатской части ввиду неопределенности результатов прогнозов температура воздуха ожидается ближе к средним многолетним значениям. Положительные аномалии температуры прогнозируются с вероятностью около 40 % в Узбекистане, Туркмении, Киргизии, Таджикистане, в южных, западных и восточных регионах Казахстана. В странах СНГ, относящихся к Европейской части, прогнозы температуры имеют высокую неопределенность. В южных регионах Европейской части температурный фон ожидается выше нормы с вероятностью около 40 % (рис. 5).

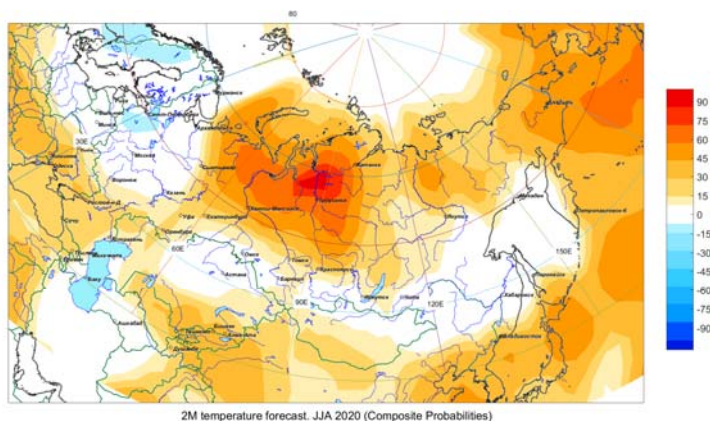


Рис. 5. Карта согласованности прогнозов, полученных на основе пяти моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2). Положительные (отрицательные) значения (в %) означают число моделей в процентном отношении, прогнозирующих положительные (отрицательные) аномалии приземной температуры воздуха.

Fig. 5. Consistency map of forecasts from forecast models (SLAV, MGO, TCC, CanSIP, CFS2). Positive (negative) values (in %) mean the number of models in percentage predicting positive (negative) surface temperature anomalies.

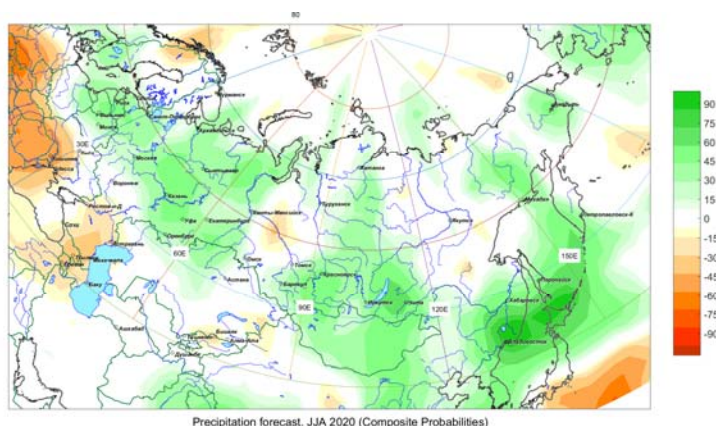


Рис. 6. Карта согласованности прогнозов осадков, полученных на основе пяти моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2). Положительные (отрицательные) значения (в %) означают число моделей в процентном отношении, прогнозирующих положительные (отрицательные) аномалии осадков.

Fig. 6. Consistency map of precipitation forecasts from 5 forecast models (SLAV, MGO, TCC, CanSIP, CFS2). Positive (negative) values (in %) mean the number of models in percentage predicting positive (negative) precipitation anomalies.

Около нормы и выше нее осадки ожидаются над большей территорией Европейской части и Урала. На юге Европейской части России количество осадков, вероятно, будет около и ниже нормы. Избыток

осадков с вероятностью 45–55 % прогнозируется на юге Сибири и Дальнего Востока, в отдельных регионах северо-востока России. В Средней Азии и Казахстане прогноз поля осадков имеет высокую неопределенность. Возможен повышенный фон увлажнения на севере Казахстана и дефицит осадков на востоке (рис. 6).

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Толстых М.А., Хан В.М. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 151-160.
2. Киктев Д.Б., Хан В.М., Крыжов В.Н., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А. Технология выпуска региональных долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 36-58.
3. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 3-40.
4. Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Гельфан А.Н. Применение статистической коррекции для детерминистских месячных и сезонных прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 121-132.
5. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Применение статистической коррекции детерминистских прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для Арктики // Труды Гидрометцентра России, 2016, Вып. 361, С. 47-65.
6. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени // Метеорология и гидрология, 2019. № 3. С. 24-39.
7. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология, 2015. № 6. С. 25-35.
8. Хан В.М. Деятельность Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) и Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной структуре ВМО по улучшению климатического обслуживания // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 5-12.
9. Хан В.М. Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийских климатических форумов в ее реализацию // Труды Гидрометцентра России, 2017. Вып. 366. С. 5-13.
10. Хан В.М., Куликова И.А., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Цепелев В.Ю. Составление консенсусных метеорологических прогнозов на сезон в рамках СЕАКОФ на примере зимы 2017/2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 88-104.
11. Цепелев В.Ю., Хан В.М. Вероятностное представление долгосрочных метеорологических прогнозов, разработанных синоптическими методами // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 17-31.
12. Use of Climate Prediction to Manage Risks // WMO-No. 1174. 2016. 39 p.
13. Coelho C.A.S. Comparative skill assessment of consensus and physically based tercile probability seasonal precipitation forecasts for Brazil // Meteorological Applications. 2013. Vol. 20. P. 236-245.
14. Graham R., Colman A., Vellinga M., Wallace E. Use of dynamical seasonal forecasts in the consensus outlooks of African Regional Climate Outlook Forums (RCOFs) // Proceedings of ECMWF Seminar on Seasonal Prediction, 3-7 September 2012. P. 237-256.

References

1. Vifland R.M., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kryjov V.N., Kulikova I.A., Tishchenko V.A., Tolstykh M.A., Khan V.M. Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 151-160 [in Russ.].
2. Kiktev D.B., Khan V.M., Kryzhov V.N., Zaripov R.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Tishchenko V.A. Technology of issue of long-range forecasts in the North-Eurasian Climate Centre (NEACC). *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2015, vol. 358, pp. 36-58. [in Russ.].
3. Mirvis V. M., Meleshko V. P. Current Status and further development of monthly and seasonal weather prediction. *Trudy GGO* [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory], vol. 558, pp. 3-40 [in Russ.].
4. Tishchenko V.A., Khan V.M., Tolstykh M.A., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Gelfan A.N. Application of statistical correction for deterministic monthly and seasonal PLAV model forecasts of air temperature and precipitation for some regions of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2015, vol. 358, pp. 121-132 [in Russ.].
5. Tishchenko V.A., Khan V.M., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Application of statistical correction to deterministic air temperature and precipitation forecasts for the Arctic region produced by SL-AV model. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2016, vol. 361, pp. 47-65 [in Russ.].
6. Tishchenko V.A., Khan V.M., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Monthly and Seasonal Prediction of Precipitation and Air Temperature in the Amur River Basin. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 3, pp. 169-179. DOI: 10.3103/S1068373919030026.
7. Tolstykh M. A., Geleyn J.-F., Volodin E. M., Bogoslovskii N. N., Vifland R. M., Kiktev D. B., Krasjuk T. V., Kostykin S. V., Mityak V. G., Fadeev R. Yu., Shashkin V. V., Shlyayeva A. V., Ezau I. N., Yurova A. Yu. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 374-382. DOI: 10.3103/S1068373915060035.
8. Khan V.M. Activity of the North-Eurasian Climate Center (NEACC) and the North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF) aimed at climate services improvement within the international structure of WMO. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2015, vol. 358, pp. 5-12 [in Russ.].
9. Khan V.M. The concept of WMO Regional Climate Outlook Forum and the contribution of North Eurasia Climate Outlook Forum to its implementation. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 366, pp. 5-13 [in Russ.].
10. Khan V.M., Kulikova I.A., Tishchenko V.A., Kruglova E.N., Tsepelev V. Yu. Consensus meteorological seasonal forecasting within NEACOF activity: a case study for winter 2017/2018. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 370, no. 4, pp. 88-104 [in Russ.].
11. Tsepelev V. Yu., Khan V.M. Probabilistic representation of long-range weather forecasts worked out using the synoptic methods. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 4, pp. 231-241. DOI: 10.3103/S1068373915040020.
12. Use of Climate Prediction to Manage Risks. WMO-No.1174, 2016, 39 p.
13. Coelho C.A.S. Comparative skill assessment of consensus and physically based tercile probability seasonal precipitation forecasts for Brazil. *Meteorological Applications*, 2013, vol. 20, pp. 236-245.
14. Graham R., Colman A., Vellinga M., Wallace E. Use of dynamical seasonal forecasts in the consensus outlooks of African Regional Climate Outlook Forums (RCOFs). *Proceedings of ECMWF Seminar on Seasonal Prediction*, 3-7 September 2012, pp. 237-256.

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

Received by the editor 20.05.2020.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»

1. В журнале публикуются статьи по проблемам современных исследований в области теории и практики гидрометеорологического прогнозирования. Статья должна быть оригинальным законченным научным исследованием, в ней рекомендуется особо подчеркнуть научный вклад автора.

Согласно этике научных публикаций, авторы не должны допускать дублирования публикаций, предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

2. В целях обеспечения качества публикуемых материалов и соблюдения авторских прав, все поступающие в редакцию журнала статьи проходят проверку на плагиат (наличие заимствований) через систему «*Antiplagiat*» и только после этого отправляются на рецензирование.

3 Статьи, поступающие в редакцию журнала, подлежат обязательному одностороннему слепому *рецензированию*. Порядок рецензирования рукописей представлен на сайте: <http://www.meteoinfo.ru/review-order>.

4. Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии с изложенными ниже требованиями. Не соответствующие требованиям рукописи будут возвращены авторам.

5. В комплект статьи должны входить:

- основной текст статьи с заглавием статьи на русском и английском языках;
- индекс УДК, соответствующий теме статьи;
- фамилии и инициалы всех авторов (полностью). Для группы авторов необходимо указать, с кем вести переговоры и переписку;
- аффилиация (организация и ее местонахождение) для всех авторов. Автор может указать в аффилиации более одной (2–3) организации с условием, что такая множественная аффилиация при приведении описываемых результатов научных исследований полностью оправдана и достоверна;
- текст авторского резюме (далее – аннотация) на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- иллюстративный материал в виде отдельных файлов в соответствии с нижеприведенными требованиями;
- названия таблиц и подрисуночные подписи на русском и английском языках;
- акт(ы) экспертизы (1 экз.).

6. *Структура статьи* обычно включает введение с постановкой проблемы и указанием актуальности, цели и задачи, методы, результаты, заключение. В конце статьи могут быть приведены благодарности лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, дана ссылка на номера грантов на выполнение работы. *Благодарности даются на русском, а затем на английском языках.*

Объем статьи – до 20 стр. текста (через 1,5 интервала), включая таблицы, рисунки и список литературы. Объем заказных статей определяется редколлегией.

Текст набирается в формате Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем 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).

7. Для всех журналов без исключения существуют требования, предъявляемые зарубежными базами данных к *заглавиям* статей:

- заглавия научных статей должны быть информативными (Web of Science это требование рассматривает в экспертной системе как одно из основных);
- в заглавиях статей можно использовать только общепринятые сокращения;
- в переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов;
- в названиях не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам (это также касается аннотаций и ключевых слов).

При формулировке названия публикации, составлении аннотации, выборе ключевых слов необходимо помнить, что именно эта часть направляется в базы данных и должна представлять интерес и быть понятной как российским читателям, так и зарубежному научному сообществу.

8. Аффiliation в статьях должна быть представлена так, чтобы правильно идентифицировать автора и исключить вероятность потери публикаций авторов, имеющих распространенную фамилию. Поэтому важно придерживаться унифицированного названия организации, как правило, зафиксированного в уставе организации и представленного на сайте организации.

9. Обязательные требования к *аннотации*:

- аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов),
- содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);
- в аннотации автор должен кратко представить результаты своей работы. Поэтому одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение;
- аннотация должна содержать значимые слова из текста статьи и использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Должна быть написана в форме активного залога: «исследование показало».

В требованиях зарубежных издательств к статьям на английском языке указывается на объем аннотации в размере 100-200 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк). В тексте английской аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

11. Ключевые слова должны

- расширять возможности нахождения статьи средствами поисковой системы;
- отражать основное содержание статьи, предметную область исследования;
- выстраиваться от общего к частному;
- включать 5–10 понятий.

12. В «традиционном» списке источников на языке оригинала описание всех источников (и русскоязычных, и иностранных) дается в соответствии с правилами российских ГОСТов. Список *литературы* должен быть пронумерован и упорядочен по алфавиту. Фамилии выделяются курсивом, пробел между именем и отчеством не ставится. В списке литературы приводятся все авторы, участвовавшие в написании той или иной работы.

Для списка литературы на латинице (*References*) не применимы правила российского ГОСТа, поскольку используемые в нем знаки не воспринимаются

зарубежными системами и ведут к ошибкам и потере данных. Подробное описание оформления списка литературы на латинице представлено на сайте журнала (<http://journal.meteoinfo.ru>; <https://meteoinfo.ru/proceedings>).

12. 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 (–); цифры 0 и буквы О в надстрочном написании в качестве символа градуса.

13. *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 «Таблица» (Вставка – Таблица). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста (книжной или альбомной ориентации). Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы:

Таблица 1. Название таблицы

14. *Рисунки* должны быть представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В текст рисунки не вставлять. Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1.

Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах в графических форматах .jpg, .tif (для возможного их редактирования), должны быть четкими, с учетом последующего уменьшения. Все надписи на картах, рисунках, схемах, диаграммах должны быть на русском языке.

Оформление подписи рисунка (11 кегль):

Рис. 1. Название рисунка.

15. *Формулы* набираются только с использованием редакторов формул Microsoft MathType или 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.

16. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

17. Авторы должны ознакомиться и следовать этике научных публикаций, размещенной на сайте издания <https://meteoinfo.ru/ethics-scientific-publications>

Этические принципы, которыми должен руководствоваться автор научной публикации

Автор (или коллектив авторов) при подаче материалов в научный журнал осознает, что несет первоначальную ответственность за новизну и достоверность результатов научного исследования, что предполагает соблюдение следующих принципов:

1. Авторы статьи должны предоставлять достоверные результаты проведенных исследований. Заведомо ошибочные или сфальсифицированные утверждения неприемлемы.

2. Авторы должны гарантировать, что результаты исследования, изложенные в предоставленной рукописи, полностью оригинальны. Заимствованные фрагменты или утверждения должны быть оформлены с обязательным указанием автора и первоисточника. Чрезмерные заимствования, а также плагиат в любых формах, включая неоформленные цитаты, перефразирование или присвоение прав на результаты чужих исследований, неэтичны и неприемлемы. Наличие заимствования без ссылки будет рассматриваться редакционной коллегией как плагиат.

3. Авторы должны приводить в рукописи только подлинные факты и сведения; приводить достаточное количество информации для проверки и повторения экспериментов другими исследователями; не использовать информации, полученной в частном порядке, без открытого письменного разрешения; не допускать фабрикацию и фальсификацию данных.

4. Не допускать дублирования публикаций (в сопроводительном письме автор должен указать, что работа публикуется впервые). Если отдельные элементы рукописи были ранее опубликованы, автор обязан сослаться на более раннюю работу и указать отличия новой работы от предыдущей.

5. Авторы не должны предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

6. Необходимо признавать вклад всех лиц, так или иначе повлиявших на ход исследования, в частности, в статье должны быть представлены ссылки на работы, которые имели значение при проведении исследования.

7. Авторы должны соблюдать этические нормы, выступая с критикой или замечаниями в отношении исследований третьих лиц.

8. Соавторами статьи должны быть указаны все лица, внесшие существенный вклад в проведение исследования. Среди соавторов недопустимо указывать лиц, не участвовавших в исследовании.

9. Авторы должны с уважением относиться к работе редколлегии и рецензентов и устранять указанные недостатки или аргументировано их пояснить.

10. Авторы должны представлять и оформлять рукопись согласно принятым в журнале правилам.

11. Если автор обнаружит существенные ошибки или неточности в статье на этапе ее рассмотрения или после ее опубликования, он должен незамедлительно уведомить об этом редакцию журнала;

12. Авторы должны предоставить редакционной коллегии или издателю доказательств правильности исходной статьи или исправить существенные ошибки, если о них редакционной коллегии или издателю стало известно от третьих лиц.

Примечание: В основу принципов по этике для авторов взяты положения из Руководства Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics – COPE) и Издательства Elsevier

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ
журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»**

Список литературы оформляют с применением правил, предусмотренных действующими ГОСТ (7.82-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. Общие требования и правила составления»; 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления»; 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка»). Ссылки на литературные источники в списке располагают в алфавитном порядке по фамилии первого автора, сначала приводятся издания на русском языке, затем – на иностранных. Работы одного автора указываются по возрастанию годов издания. В тексте ссылки на номера источников даются в квадратных скобках.

Примеры:

1) книги:

Зуев А.А. Заглавие (обязательно полное). 5-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 2009. 99 с.

Берг Л.С. Очерки по истории русских географических открытий. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 296 с.

Ferguson-Smith V.A. The indications for screening for fetal chromosomal aberration // Prenatal Diagnosis Inserm / Ed. by Boue A. Paris, 1976. P. 81-94.

2) диссертации и авторефераты:

Натанов Я.М. Название диссертации: Дис. ... канд. (докт.) геогр. наук. М.: Название учреждения, 2008. 108 с.

Натанов Я.М. Название диссертации: Автореф. дис. ... канд. (докт.) геогр. наук. М.: Название учреждения, 2008. 20 с.

3) статьи:

Горюнов Н.Л. Название статьи // Название журнала (сокращенное и без кавычек). 1989. Т. 66, № 9. С. 99-102.

Алексеев Г.В., Нагурный А.П. Роль морского льда в формировании годового цикла двуокси углерода в Арктике // ДАН. 2007. Т. 417, № 4. С. 541-544.

Nicolaides K.N. Screening for fetal chromosomal abnormalities need to change the rules // Ultrasound Obstet. Gynecol. 1994. Vol. 4, no. 3. P. 353-355.

EPICA Community Members. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica // Nature. 2006. Vol. 444. P. 195-198.

4) электронный ресурс:

Егоров С.В. Район Тепли–Джимарай–Казбек. 2003.
http://www.mountain.ru/world_mounts/caucasia/kasbek/2003/opisanie/

После формирования блока Списка литературы, его представляют на английском языке под заголовком **References**, повторяя список литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, они полностью повторяются в References. Совершенно недопустимо при этом в References для оформления ссылок использовать российский ГОСТ.

1) ссылки на иностранные публикации в References:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. Title of journal. 2010, vol. 30, no 2, pp. 496-507.

2) статьи из переводных российских журналов:

Gubenko I.M., Rubinshtein K.G. Thunderstorm activity forecasting based on the model of cumulonimbus cloud electrification. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2017, vol. 42, no. 2, pp. 77-87. [in Russ.].

3) статья в электронном журнале:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *J. Computer-Mediated Communication*. 1999, vol. 5, no. 2, available at: www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/ [in Russ.].

Общая схема описания источника литературы в References:

- ФИО авторов через запятую (транслитерация) – *курсив*;
- транслитерация заглавия на английский язык;
- перевод заглавия – заключается в квадратные скобки;
- транслитерация название источника – *курсив*;
- название источника на английском языке (если есть) – заключается в квадратные скобки;
- выходные данные (место издания, год, номер выпуска, страницы) с обозначениями на английском языке, название города пишем полностью;
- указание на язык работы.

Kozachun G.U., Lapko N.A. Sovremennaya tipologiya zhilykh zdaniy. Chast' II [Modern typology of residential units. Part 2]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2011, no. 2, pp. 14-17. [in Russ.].

4) материалы конференции:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Proc. 6th Int. Technol. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"*. Moscow, 2007, pp. 267-272. [in Russ.].

Несколько правил:

- рекомендуем использовать для транслитерации специальные интернет-ресурсы: <http://www.translit.ru>
- в выходных данных публикаций в ссылках (статей, книг) необходимо указывать количество страниц публикации: диапазон страниц в издании указывается "pp." перед страницами; количество страниц в полном издании (книге) – указывается как "р." после указания количества страниц;
- необходимо убирать специальные разделители между полями ("//", "–");
- полное место издания пишется на английском языке. Издательство лучше обозначать добавлением слова Publ. Название издательства оставляем транслитерированным.
- если описываемая публикация имеет doi, его обязательно надо указывать в библиографическом описании в References, так как этот идентификатор является наиболее точным источником информации о статье;
- нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников;
- в описаниях русскоязычных учебников, учебных пособий не следует указывать тип изданий;
- англоязычные названия ВУЗов, журналов и т.д. можно найти на сайте <http://elibrary.ru>.

5) книги (монографии, сборники, труды конференций в целом):

Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompozitov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii [White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation]. *Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers and Manufacturers in the Field of Nanotechnology*. Moscow, LKI, 2007. [in Russ.].

Nenashev M.F. Poslednee pravitel'stvo SSSR [Last government of the USSR]. Moscow: Krom Publ., 1993, 221 p. [in Russ.].

Kanevskaya R.D. Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov [Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development]. Izhevsk, 2002, 140 p. [in Russ.].

Latyshev V.N. Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanie metallov [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting]. Ivanovo: Ivanovskii Gos. Univ., 2009. [in Russ.].

Гидрометеорологические исследования и прогнозы

№ 2 (376)

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук А.Р. Ивановой

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»
Адрес: 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13
Телефон: (499) 252-34-48, факс: (499) 255-15-82
e-mail: hmc@metcom.ru
www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 16.06.2020. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 00. Тираж 300 экз. Заказ № 0000
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3