

19. Mahrt, L., 2000. *Surface Heterogeneity and Vertical Structure of the Boundary Layer*. *Boundary-Layer Meteorol.* 96, 33–62. <https://doi.org/10.1023/A:1002482332477>
20. Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T.W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G.G., Bou-Zeid, E., 2019. *Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population*. *Nature* 573, 55–60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
21. Mayer, M., Tietsche, S., Haimberger, L., Tsubouchi, T., Mayer, J., Zuo, H., 2019. *An Improved Estimate of the Coupled Arctic Energy Budget*. *J. Clim.* 32, 7915–7934. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0233.1>
22. Miles, V., Esau, I., 2020. *Surface urban heat islands in 57 cities across different climates in northern Fennoscandia*. *Urban Clim.* 31, 100575. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100575>
23. Stewart, I.D., Krayenhoff, E.S., Voogt, J.A., Lachapelle, J.A., Allen, M.A., Broadbent, A.M., 2021. *Time Evolution of the Surface Urban Heat Island*. *Earth's Futur.* 9. <https://doi.org/10.1029/2021EF002178>
24. Varentsov, M., Konstantinov, P., Baklanov, A., Esau, I., Miles, V., Davy, R., 2018. *Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city*. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 17573–17587. <https://doi.org/10.5194/acp-18-17573-2018>
25. Zilitinkevich, S., Esau, I., Baklanov, A., 2007. *Further comments on the equilibrium height of neutral and stable planetary boundary layers*. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 133, 265–271. <https://doi.org/10.1002/qj.27>

## Numerical simulation of severe weather phenomena on the territory of Western Siberia

Zolotov S.Yu., Loginov A.S.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [sergey-zo@yandex.ru](mailto:sergey-zo@yandex.ru)

Recently, researchers are increasingly using physical and mathematical numerical models to solve problems in meteorology and climatology. The special value of using these models is given by the ability to recreate a variety of situations with severe weather phenomena (hurricanes, heavy showers, severe frost, etc.).

The Weather Research and Forecasting (WRF) predictive model is used in this research. The WRF model is a mesoscale numerical weather prediction system designed for both atmospheric research and operational forecasting applications. The model serves a wide range of meteorological applications across scales from tens of meters to thousands of kilometers. This model is also suitable for calculating the likelihood of occurrence of extreme events in the study area.

The region of Western Siberia was chosen as the study area with coordinates 47°–63°N and 65°–105°E. A rare meteorological network on such a vast territory does not make it possible to study and predict factors leading to severe weather phenomena. Modeling is used to eliminate this problem. This paper examines two cases in this region with severe weather events over 2019–2020.

The first case is a situation with the occurrence of a large temperature gradient in the lower atmosphere on April 30, 2019, during the development of abnormally early thunderstorms and squalls. Since April 28, 2019, significant spatio-temporal changes in many meteorological and geophysical parameters have taken place on the territory of Western Siberia, due to the displacement of the polar main front far to the north and the short-term invasion of the tropical air mass, as well as the subsequent passage of the cold front and the onset of the Arctic air mass.

The second case is a situation with the emergence of a large area of anomalous cold wave on the territory of Western Siberia on December 25–27, 2020. Since December 22, the formation of an anticyclone with a value of 1035 hPa with a center near the Severnaya Zemlya archipelago has been recorded. By December 24, its center increased to 1050 hPa. As the Arctic front moved to the southeast, the formation of a high pressure ridge was noted, which was directed to the south of Western Siberia. During this period, cloudiness cleared over most of Western Siberia, as well as high values of atmospheric pressure (1030–1040 hPa) and a sharp drop in air temperature with an average daily air temperature below the climatic norm by 9 °C and more to –40 °C and below.

To check the simulation results, observational data from 211 meteorological stations were used. An analysis of the comparison of the simulation results with the observed values of the fields of meteorological parameters gives a satisfactory assessment of the reproduction of these fields. The WRF model has shown that it adequately reproduces the occurrence of convective systems and correctly calculates the conditions for the occurrence of factors (for example, a sharp increase in the pressure field, advection of cold air, radiation cooling) leading to severe weather phenomena.

# Численное моделирование опасных погодных явлений на территории Западной Сибири

Золотов С.Ю., Логинов А.С.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: sergey-zo@yandex.ru

Для решения задач в метеорологии и климатологии часто используются физико-математические численные модели. В настоящий момент использование таких моделей в научных исследованиях применяется благодаря возможности выбора различных схем параметризации с опцией постоянного увеличения пространственного разрешения. Особую ценность применения этих моделей придает возможность воссоздания разнообразных ситуаций с опасными явлениями погоды (ураганы, сильные ливни, сильный мороз и т.п.).

В данной работе использована прогностическая модель Weather Research and Forecasting (WRF). Модель WRF – это мезомасштабная прогностическая модель и система ассимиляции данных современного поколения. Модель разработана для исследования атмосферных процессов и явлений мелкого (1–10 км) и среднего (порядка сотни километров) пространственного масштаба, в частности, и для расчета вероятности возникновения экстремальных явлений в исследуемой области.

Последние версии модели WRF включают в себя передовые технологии численного моделирования и ассимиляции данных, возможности расчета на вложенных сетках и усовершенствованные методы параметризации различных физических процессов. С помощью модели WRF предоставляются возможности проведения экспериментов для разнообразных случаев, включающие в себя моделирование реальных и идеализированных данных, выбор для них различных граничных условий, обширный набор параметризаций физических процессов, негидростатическое и гидростатическое приближение (на выбор), проведение расчетов во вложенных областях с односторонним и двусторонним влиянием.

Модель основана на численном решении системы уравнений гидротермодинамики атмосферы с учетом процессов в верхнем слое суши или воды. Процессы подсеточного масштаба учитываются с помощью параметризаций. В модели WRF используется большое количество схем параметризаций физических процессов, которые можно комбинировать.

В качестве исследуемой была выбрана область Западной Сибири с координатами 47°–63° с.ш. и 65°–105° в.д. В центре данной области находится город Томск. В данной работе рассматриваются два случая в этом регионе с опасными явлениями погоды за 2019–2020 гг.

Первый случай представляет собой ситуацию с возникновением большого температурного градиента в нижнем слое атмосферы в период развития аномально ранних гроз и шквалов. При моделировании события пространственно-временной изменчивости температуры воздуха, произошедшее 29–30 апреля 2019 г., наблюдаются аномально ранние для Западной Сибири явления грозы и шквалы. Начиная с 25 апреля, на территории Западной Сибири происходили значительные пространственно-временные изменения многих метеорологических и геофизических величин, обусловленные смещением далеко на север полярного основного фронта и кратковременным вторжением тропической воздушной массы, а также последующим прохождением холодного фронта и наступлением арктической воздушной массы.

В частности, поле температуры воздуха на высоте 2 м в 8:00 (UTC+07) 30 апреля 2019 года над исследуемой территорией было очень контрастным. Температура воздуха изменялась в диапазоне от -32 °C на северо-западе до +18 °C в центре региона (вблизи г. Томска). Градиент температуры воздуха составлял порядка 45 °C в диапазоне 10 градусов широты. При этом ярко прослеживается область, вытянутая с юго-запада на северо-восток, обусловленная адвекцией тепла. Положению данной области соответствуют очаги сильной неустойчивости, хорошо проявляющиеся в полях изменения приземного давления и вертикальной компоненте ветра.

В этот же день отмечалась наименьшее значение приземного атмосферного давления 981 гПа, которое за последующие двое суток (до 3 мая) резко возросло до 1011 гПа (15 гПа/сутки). На контрастном холодном фронте рассматриваемой территории отмечалась активная грозовая деятельность со шквалистым усилением ветра до 23 м/с. На стадии максимального развития циклона холодные фронты арктической и полярной систем сблизилась друг к другу на расстояние до 500 км с дальнейшим смещением на восток.

Второй случай представляет собой ситуацию с возникновением большой области аномального холода на территории Западной Сибири 25–27 декабря 2020 года. С 22 декабря зафиксировано образование антициклона со значением 1035 гПа с центром у архипелага Северная Земля. К 24 декабря произошло усиление его центра до 1050 гПа. По мере смещения арктического фронта к юго-востоку отмечалось образование гребня высокого давления, который был направлен на юг Западной Сибири.

В этот период отмечалось прояснение облачности над большей частью Западной Сибири, а также

высокие значения атмосферного давления (1030-1040 гПа) и резкое падение температуры воздуха (со среднесуточной температурой воздуха ниже климатической нормы на 9°C и более до -40°C и ниже). В частности, 25 декабря с 15:00 до 18:00 (UTC+07) граница области холода ниже -40°C сместилась на юг сразу на 5 градусов широты.

25-26 декабря центральная часть рассматриваемой территории находилась на восточной периферии гребня высокого давления. При этом происходит быстрое падение температуры в связи с сильной адвекцией холодного воздуха со стороны полуострова Таймыра. Облачность полностью рассеялась. Арктический антициклон с центром над Карским морем и его южный гребень образовали огромную протяженную зону очень высокого давления (1045 гПа и выше), простирающуюся от 50° до 80° с.ш.

При моделировании обоих случаев выбирались следующие схемы параметризации:

1) Физика подстилающей поверхности реализуется схемой Unified Noah land-surface model. Данная схема моделирует влажность почвы (как жидкую, так и мерзлую), температуру почвы, температуру поверхности земли, глубину снежного покрова (с учетом его водного эквивалента и плотности), содержание воды в растительном покрове, а также параметры потока энергии и потока воды с учетом их баланса на поверхности почвы.

2) Модель WRF включает в себя параметризацию поверхностного слоя с учетом процессов обмена теплом и влагой между атмосферой и подстилающей поверхностью, вязкого слоя, уровня шероховатости и слоя постоянных турбулентных потоков.

3) Параметризация радиационных процессов разделяет длинноволновую и коротковолновую солнечную радиацию. Длинноволновая радиация определяется излучением от подстилающей поверхности, которое зависит от категории типа поверхности, а также ее температуры. Коротковолновое излучение представляет диапазон видимых длин волн, входящие в спектр солнечного света. Схема атмосферного излучения рассчитывает поглощение, отражение и рассеяние солнечной радиации в атмосфере с учетом распределения компонент, участвующих в этих процессах: поглощение излучения водяным паром, углекислым газом, озоном, оксидом азота, метаном, двуокиси углерода, а также облака со случайным перекрытием. В данной работе проводился выбор между тремя такими схемами: Rapid Radiative Transfer Model, Goddard и Fu-Liou-Gu.

4) Для параметризации планетарного пограничного слоя схемы учитывают турбулентность в пограничном слое и в свободной атмосфере, рассчитывают вертикальные градиенты температуры воздуха и ветра, высоту пограничного слоя, процессы облакообразования. Для модельных расчетов проводился выбор среди схем Quasi-Normal Scale Elimination - Eddy-Diffusivity Mass-Flux, Mellor-Yamada-Janjic, Yonsei University, Mellor-Yamada Nakanishi and Niino, Asymmetric Convective Model, Bougeault-Lacarrere, Bretherton and Park, Total Energy - Mass Flux, Shin-Hong, Grenier-Bretherton-McCaa.

5) Микрофизика (с учетом состояний воды) реализуется схемами, позволяющими осуществлять переходы между категориями: водяной пар, дождь, снег, снежная крупа, лед и облачность. Вместе с осадением облачного льда ряд схем микрофизики показывают взаимодействие между количеством облаков, поверхностных осадков и крупномасштабной средней температуры за счет представления обратной связи со льдом в облаках и радиацией. В данном моделировании участвовали схемы WRF-Single/Double-Moment-Microphysics 6/7-class, Kessler, Purdue Lin, Ferrier Eta, Goddard 4-ice, Thompson, Milbrandt-Yau Double-Moment 7-class, Morrison double-moment, Stony Brook University (Y. Lin), Hebrew University of Jerusalem (Israel) spectral bin, Morrison and Milbrandt, Jensen ISHMAEL, National Taiwan University.

6) Параметризация облачности позволяет учитывать процессы перемешивания воздуха в облаках и в окружающей среде, рассчитывать свойства восходящих/нисходящих потоков у основания и вершины облачности, а также оценивать процессы развития как сплошной облачности, так и отдельных облаков. В данном исследовании были задействованы схемы Tiedtke, Kain-Fritsch, Betts-Miller-Janjic, Grell-Freitas, Simplified Arakawa-Schubert, Zhang-McFarlane, Grell-Devenyi ensemble.

Для проверки результатов моделирования были задействованы данные наблюдений 211 метеостанций, расположенных в исследуемой области. Совместный анализ результатов моделирования и данных наблюдений в обоих случаях представлен в таблице 1. Анализ сравнения результатов моделирования с наблюдаемыми значениями полей метеовеличин дает удовлетворительную оценку воспроизведения этих полей. Модель WRF показала, что она адекватно воспроизводит возникновение конвективных систем и корректно рассчитывает условия возникновения факторов (например, резкое возрастание поля давления, адвекции холодного воздуха, радиационное выхолаживание), приводящих к опасным явлениям погоды.

**Таблица 1.**

Среднее значение ряда модуля отклонений между моделируемой величиной в точке нахождения метеостанций и данными наблюдений.

Дата	Температура воздуха на 2 м, °С	Давление воздуха на поверхности земли, гПа	Скорость ветра на 10 м, м/с	Количество осадков за 12 часов, мм
Первый случай				
28.04.2019	2.02±1.65	1.13±1.31	2.43±1.84	0.91±2.00
29.04.2019	2.23±1.84	0.90±1.03	2.43±1.77	1.57±2.60
30.04.2019	2.41±1.87	0.79±0.68	2.14±1.60	1.43±2.38
1.05.2019	2.28±1.89	1.06±1.09	2.06±1.62	1.01±1.95
2.05.2019	2.10±1.83	0.67±0.59	1.69±1.29	0.32±1.25
Второй случай				
23.12.2020	3.36±2.58	0.91±0.73	2.68±1.95	0.91±1.28
24.12.2020	4.00±2.81	1.03±0.77	2.66±2.03	1.03±1.49
25.12.2020	6.03±3.55	1.40±1.21	1.98±1.65	0.79±1.23
26.12.2020	4.78±3.25	1.07±0.78	1.82±1.42	0.15±0.39
27.12.2020	3.66±2.81	1.02±1.88	2.51±1.80	0.13±0.54

Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300154-1.

## Numerical modeling of Arctic river heat influence on the sea ice state

**Gradova M., Golubeva E.**

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia  
E-mail: tarkhanova@sscc.ru

In this study, we analyze the contribution of thermal runoff of Siberian Rivers to the reduction of sea ice in the Arctic basin in 2000-2020 based on numerical modeling. The three-dimensional numerical model SibCIOM developed at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS was used for the experiments [7-8]. Sea ice was described using the CICE-3 model of the Los Alamos National Laboratory, USA [9]. For the formation of fluxes at the atmosphere-ocean and atmosphere-ice boundaries, NCEP/NCAR atmospheric reanalysis data were used [10]. The modeling domain included the Arctic Ocean and the Atlantic Ocean bounded by 20°S.

Numerical experiments were performed for the time interval 2000-2020. To set the river runoff, monthly averaged discharge values of major Arctic rivers (Lena, Yenisei, Ob, Pur, Kolyma, Yana, Indigirka, Olenek, Northern Dvina, Pechora, Mackenzie) from the ArcticGRO data set [11] from early 2000 to June 2020 were used. The values of mean monthly river water temperature for the control experiment E-R, obtained from the Arctic River Discharge and Temperature (ARDAT) data set [3], were taken into account for the four largest rivers (Lena, Yenisei, Ob, Mackenzie). In the numerical experiment E-0, unlike the control experiment E-R, the river water temperature was not taken into account. It was assumed that the temperature of river water entering the sea is equal to the sea temperature. The deviations of the mean annual ice volume fields in experiment E-0 relative to the control E-R were analyzed, as well as the fraction of these deviations relative to the mean annual E-R volume values.

The E-R and E-0 results comparison shows that cutting off the account of river heat influx has the most significant effect on the areas adjacent to the river mouth (ice reduction ranges from 26 to 46% in some years) and the shallowest parts of the shelf. Still, the effect is much more than that. The report identifies areas in the deepest parts of the Arctic Ocean that are the most sensitive to river heat influx. Such areas are found in regions of the Arctic basin, located directly behind the shelf of the Barents, Laptev and East Siberian Seas.

*This work was supported by RFBR grant 20-05-00536 A.*