

**Д.М. Фролов**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва (Россия)

**СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В РОССИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ  
НА ИЗМЕНЕНИЕ В ГЛЯЦИОСФЕРЕ**

*Аннотация.* На Земле в последние десятилетия интенсивно идёт глобальное изменение климата. Так, за последние пятьдесят лет усреднённая среднегодовая температура воздуха на планете уже повысилась на один градус. Прошедший 2020 год считается самым тёплым за всю историю наблюдений по данным метеообсерватории МГУ для Москвы, по данным Гидрометцентра для всей России и по данным Copernicus Climate Change Service (C3S) для всего Земного шара. Согласно данным о недавнем изменении климата в работе рассмотрено их влияние на изменение состояния гляциосферы (снежный покров, морские льды и промерзание грунта). Так, зимний период 2019/20 года в Московском регионе был необычайно тёплым, и поэтому снега в московском регионе в зимний период 2019/20 года было мало. В конце весны из-за аномально высоких температур и как следствие значительной толщины сезонно-талого слоя произошло разрушение резервуара и разлив нефтепродуктов в реку в Норильске. Однако тёплое лето 2020 года повлекло одно из самых минимальных летних значений площади распространения морского льда в Арктике за всю историю наблюдений и, как следствие, аномально сильные минимальные температуры и обильные снегопады зимой 2020/21 года в Евразии и в Москве.

*Ключевые слова:* изменение климата, снежный покров, морские льды, промерзание грунта.

**D.M. Frolov**

Lomonosov Moscow State University, Moscow (Russia)

**MODERN VARIATIONS OF CLIMATE IN RUSSIA AND THEIR INFLUENCE  
ON THE VARIATIONS IN GLACIOSPHERE**

*Abstract.* In recent decades, global climate change is going on intensively on Earth. So, over the past fifty years, the average annual air temperature on the planet has already increased by one degree. Past 2020 year is considered as the warmest during the record period according to meteorological observatory of MSU for Moscow, according to Russian meteorological center for the whole Russia, and according to the Copernicus Climate Change Service (C3S) for the entire globe. According to the data on the recent climate change in the work the influence on the variations in glaci-sphere (snow cover, sea ice and ground freezing) is considered. So the winter period of 2019/20 in the Moscow region was unusually warm, and therefore there was very little snow in the Moscow region in winter period 2019/20. In late spring, due to abnormally high temperatures and as a result of the significant thickness of the seasonally thawed layer, the reservoir was destroyed and oil prod-

ucts were spilled in river in Norilsk. However, the warm summer of 2020 resulted in one of the lowest summer values of the sea ice extent in the Arctic in the entire history of observations and, as a result, abnormally strong minimum temperatures and heavy snowfall in the winter of 2020/21 in Eurasia and in Moscow.

*Keywords:* climate change, snow cover, sea ice, ground freezing

На Земле в последние десятилетия интенсивно идёт глобальное потепление климата. Так, за последние пятьдесят лет усреднённая среднегодовая температура воздуха на планете уже повысилась на один градус. Это отражено на рис. 1:

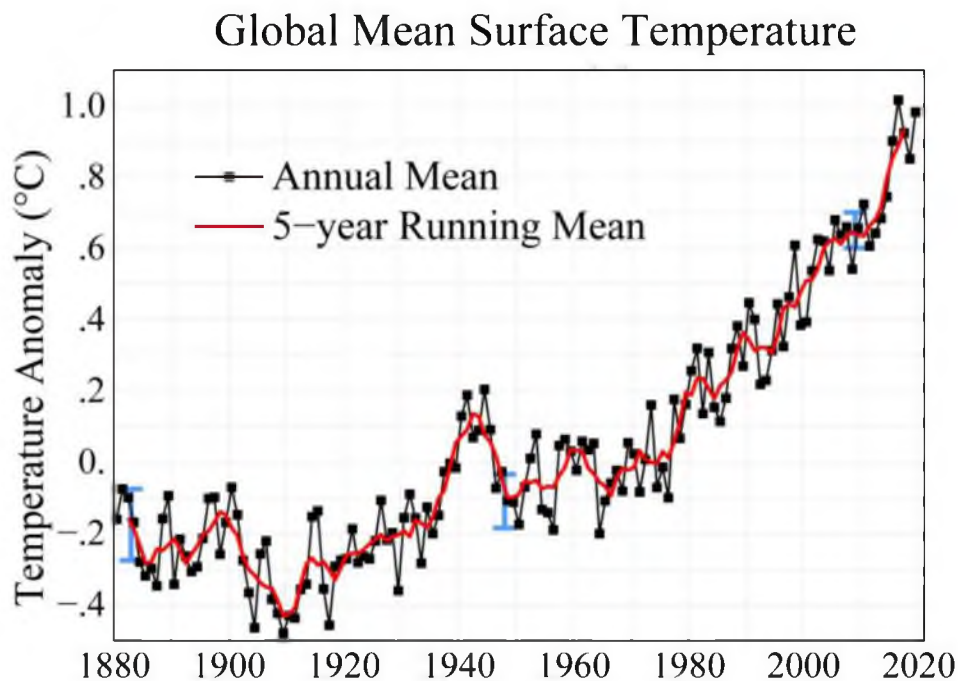


Рис. 1. Аномалии среднегодовой температуры воздуха на планете за последние 140 лет [5]

В связи с нарастающим в последние десятилетия интенсивным потеплением климата идёт интенсивное перераспределение залегания снежного покрова [1], которое также отражено на рис. 2:

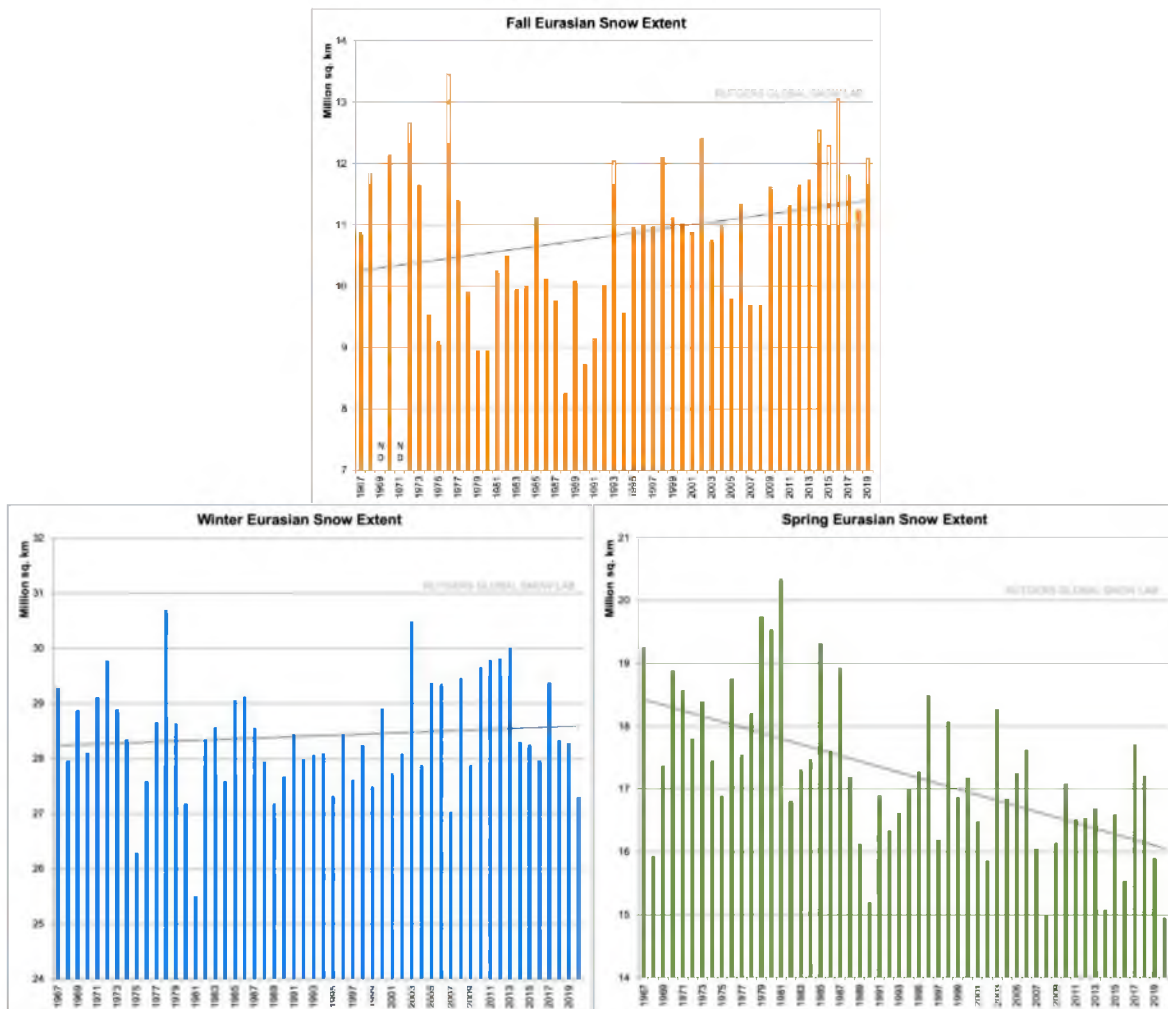


Рис. 2. Изменение площадь распространения снежного покрова в осенний, зимний и весенний периоды в Евразии за последние 50 лет по данным Rutgers University [2]

На рис. 2 особенно видно и как показывают данные спутниковых наблюдений и по результатам их обработки в университете Рутгерс, площадь распространения весеннего снежного покрова в последние десятилетия уменьшается, зимнего - остается прежней, а осеннего - увеличивается. В купе с идущим повышением температуры воздуха, это ведёт к уменьшению толщины зимнего промерзания грунта и к увеличению толщины летнего оттаивания многолетнемерзлых пород, что ведёт далее к нарушению устойчивости зданий и сооружений.

Причём распространение снежного покрова весной 2020 достигло минимума, так как прошедший зимний период 2019/2020 на территории Евразии был особенно тёплым (положительная аномалия температуры наблюдалась почти во все месяцы на рис. 3):

И согласно данным Росгидромета, прошлая зима 2019/2020 года на территории России была действительно очень теплой, а весна наступила на месяц раньше. За первые четыре месяца 2020 года температура в регионах Сибири превышала на 5-10 градусов те значения, которые были в те же месяцы последние 10 лет. Летние температуры в Северном полушарии в 2020 году превышали норму на 3-5 градусов, причём самые заметные превышения температуры были в Арктике.

В Москве же, по данным метеостанции ВДНХ [3], значение температуры воздуха в ноябре зимнего периода 2019/2020 составило 1,8 °С при среднем за 1981-2010 гг. ([3]) значение -1,2°С. В декабре оно составило 0,8°С (при средней норме -5,2°С), в январе 0,1°С (при -6,5°С), в феврале -0,3°С (при -6,7°С) и в марте 3,8°С (при -1,0°С) (рис. 3). Количество осадков по данным метеостанции ВДНХ [3] в Москве в зимний сезон (ноябрь-февраль) 2019/2020

года было чуть меньше нормы (1980-2010) [4]. В ноябре 2019 года выпало 35 мм при средней норме за 1981-2010 гг. ([4]) 55 мм. В декабре 33 мм при средней норме 52 мм, в январе 55 мм при средней норме 52 мм, в феврале 40 мм при средней норме 41 мм и в марте 51 мм при средней норме 35 мм (рис. 4).

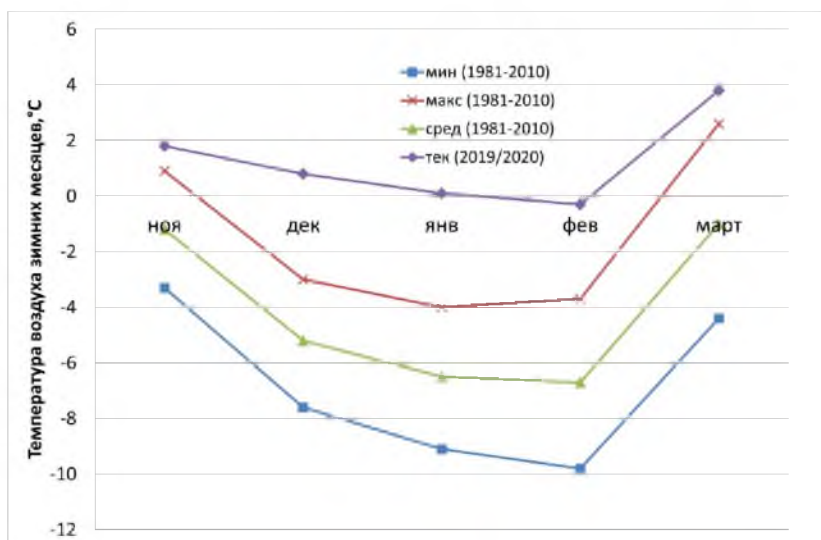


Рис. 3. Температура воздуха в зимние месяцы 2019/2020 и средние, максимальные и минимальные значения за 1980-2010 гг. [3, 4]

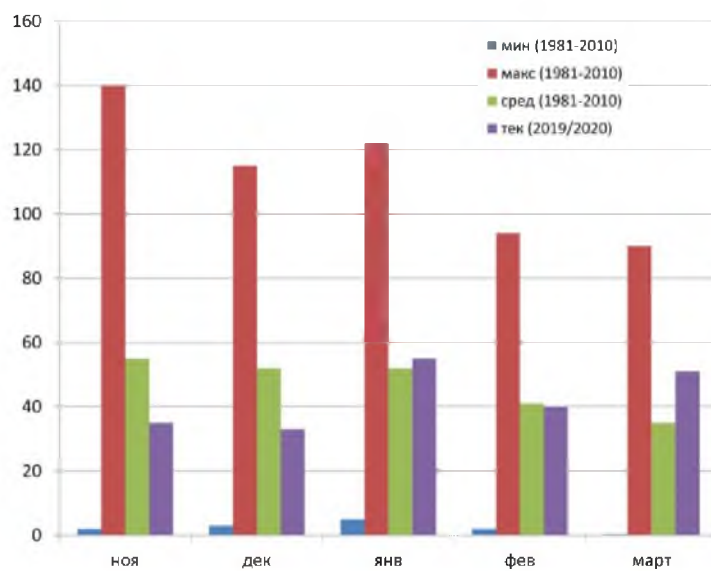


Рис. 4. Количество осадков в зимние месяцы 2019/2020 и средние, максимальные и минимальные значения за 1980-2010 гг. [3, 4]

В связи с экстремально тёплой погодой, устойчивый снежный покров, в частности, в Москве и Московской области в зимний сезон 2019/2020 гг. окончательно установился только лишь с 23 января (хотя и выпадал с 30 декабря по 18 января). 23 января мощность снежного покрова в Битцевском парке изменялась от 3,5 см в ельнике, до 5 см в лиственном лесу. Однако, он постоянно подвергался воздействию оттепелей, и его толщина на метеостанции ВДНХ не превышала 11см. Эти значения являются рекордными, так как лишь зимой 2006/2007 года по данным метеостанции ВДНХ снежный покров установился только на 21 января, и зимой 2013/14 года максимальная за сезон толщина снежного покрова достигала только 15 см (рис. 5).



Рис. 5. Изменение температуры и толщины снежного покрова в Москве в зимний сезон 2019/2020 гг.

Установившийся в конце января снежный покров разрушился в первой декаде марта. Тем не менее, в марте и апреле в результате залповых снегопадов еще несколько раз устанавливался кратковременный (от нескольких часов, до 2-4 дней) снежный покров.

Таким образом, в зимний период (ноябрь-март) 2019/2020 значение температуры воздуха составило  $1,2^{\circ}\text{C}$ , то есть она была на  $5,5^{\circ}\text{C}$  выше среднего за 1981-2010 [4] значения (рис. 6).

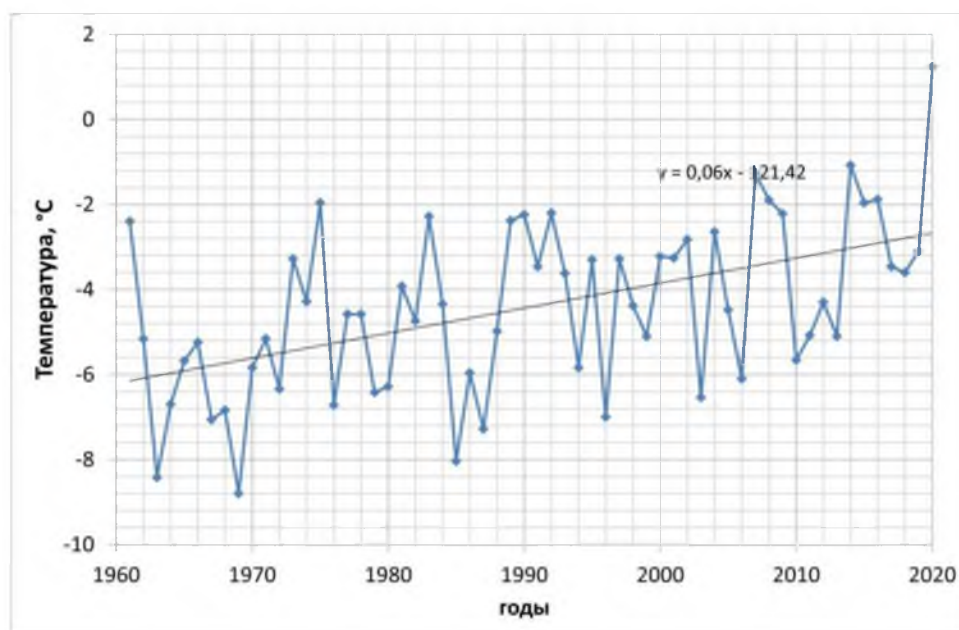


Рис. 6. Средняя температура воздуха зимних месяцев (ноябрь-март) в Москве за 1961-2020 гг.

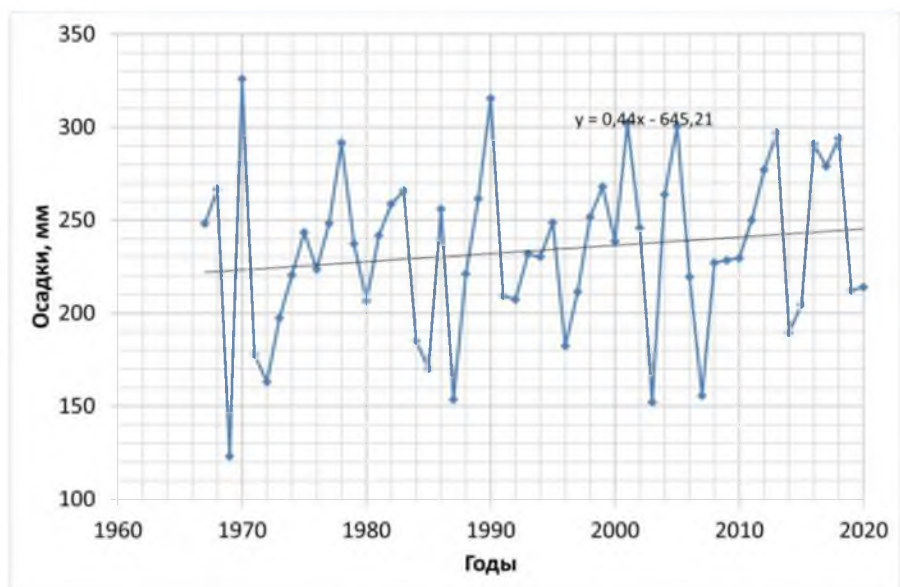


Рис. 7. Изменение суммы осадков зимних месяцев (ноябрь-март) в Москве за 1961-2020 гг.

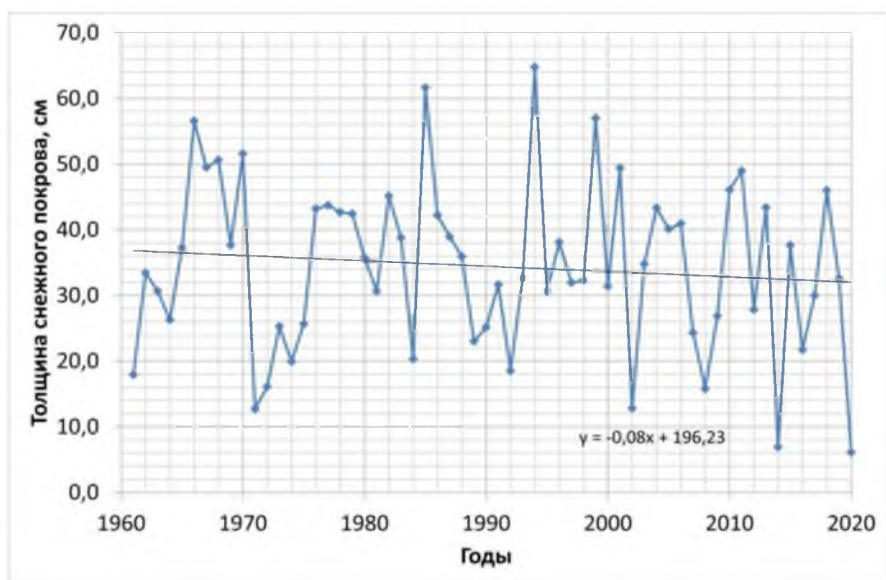


Рис. 8. Изменение средней за февраль толщины снежного покрова в Москве за 1961-2020 гг.

В предыдущие же зимние периоды (ноябрь-февраль) 2018/2019 и 2017/18 года температура воздуха в Москве была всего лишь на  $1,1^{\circ}$  и на  $0,6^{\circ}\text{C}$  выше среднего за 1981-2010 ([4]) значения (рис. 6). Толщина же снежного покрова в зимний сезон 2018/2019 достигала 49 см и имела среднее за февраль значение 32 см (рис. 8). Таким образом, текущий зимний период 2019/2020 за месяцы с ноября по март является рекордным.

Месяц май в Москве характеризовался рекордно интенсивными осадками, что привело к подтоплению дачных участков в области. Поэтому аномалии температуры воздуха в первые месяцы 2020 года на территории Северного полушария с ясно заметной положительной аномалией на территории Северной Евразии и Сибири отображены на рис. 9:

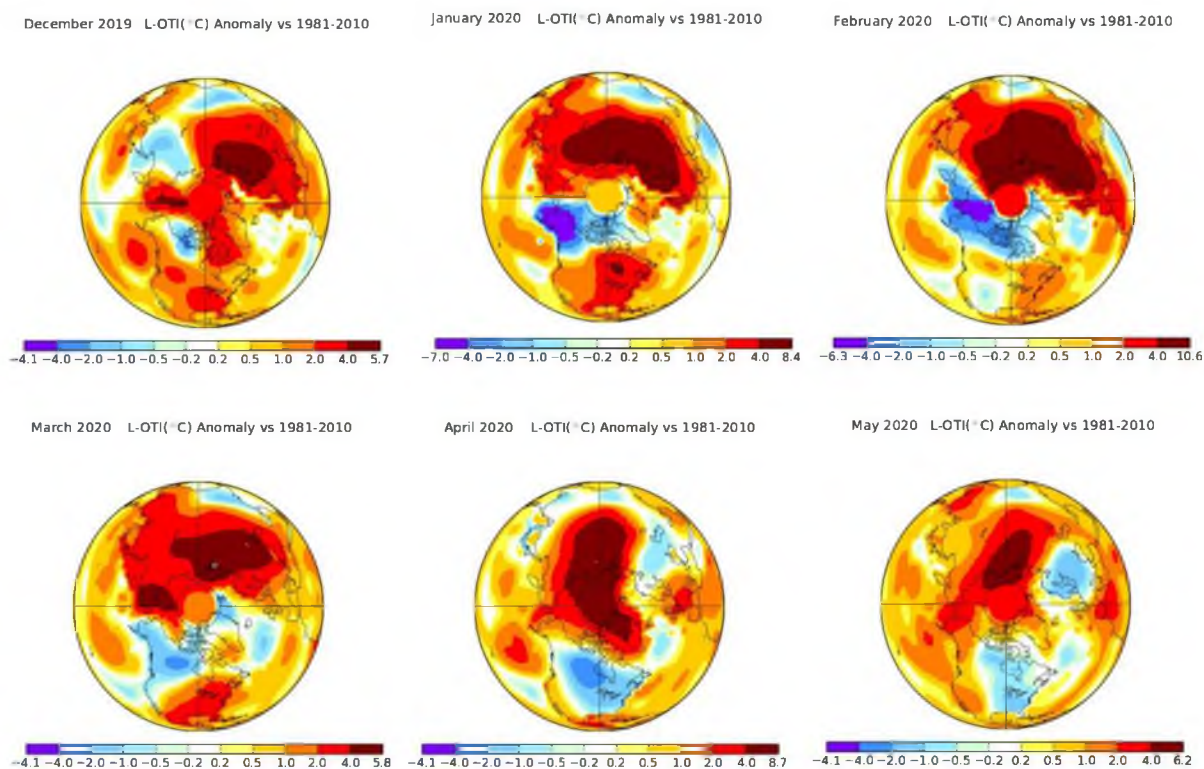


Рис. 9. Аномалии температуры воздуха в Северном полушарии в конце 2019 и первой половине 2020 года относительно средних многолетних значений за 1981-2010 гг. [5]

Наблюдаемое аномальное тепло в весенний сезон 2020-го года повело к аномально сильному оттаиванию мерзлоты и, как следствие, к повреждению фундаментов зданий и линейных сооружений и к техногенным катастрофам, а также к природным пожарам. Вообще же рост толщины деятельного слоя многолетнемёрзлых грунтов в последние годы на территории Сибири и аномально тёплый зимне-весенний период 2020 года привел, например, к экологической катастрофе в конце мая 2020 года, связанной с протаиванием фундамента и разрушением резервуара с нефтью вблизи Норильска и попаданием нефтепродуктов в реку [5].

Согласно произведённым наблюдениям и расчётам, мёрзлые грунты в Арктике и Субарктике стали таять в 2020 году на 30 процентов сильнее из-за теплой погоды. По данным метеостанции Игарка [3, 4], температура воздуха в Игарке в ноябре зимне-весеннего периода 2019/2020 гг. Составляла  $-20,6^{\circ}\text{C}$  при средней норме за 1981-2010 гг.  $-20^{\circ}\text{C}$ . В декабре было  $-20,9^{\circ}\text{C}$  (при средней норме  $-25,36^{\circ}\text{C}$ ), в январе  $-20,9^{\circ}\text{C}$  (при  $-26,9^{\circ}\text{C}$ ), в феврале  $-16,1^{\circ}\text{C}$  (при  $-25,5^{\circ}\text{C}$ ), в марте  $-13,8^{\circ}\text{C}$  (с  $-17,9^{\circ}\text{C}$ ), в апреле  $-0,3^{\circ}\text{C}$  (с  $-11,1^{\circ}\text{C}$ ) и в мае  $6,2^{\circ}\text{C}$  (с  $-1,4^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 10).

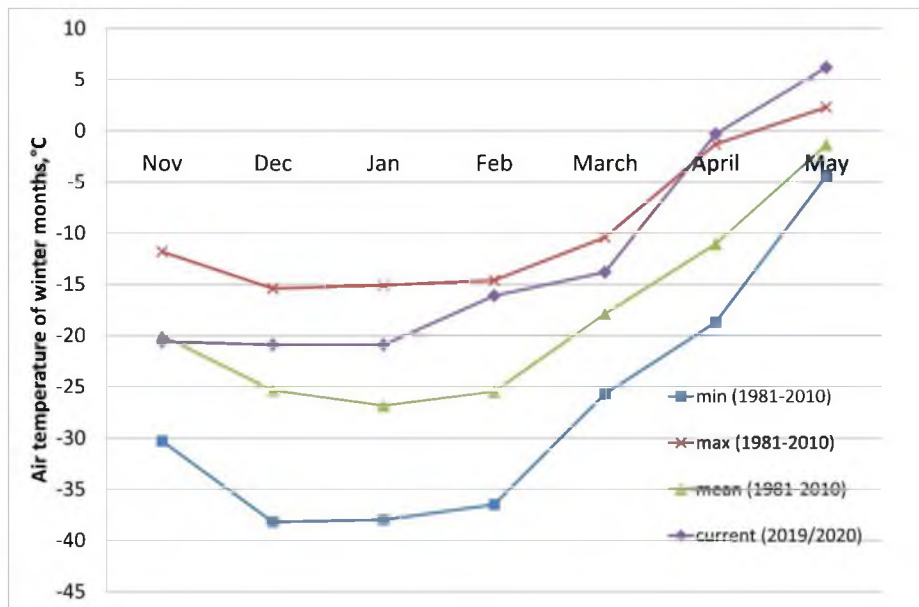


Рис. 10. Изменение температуры воздуха по месяцам в зимний период 2019/20 и их сравнение средними, максимальными и минимальными многолетними значениями за 1981-2020 гг. [3, 4]

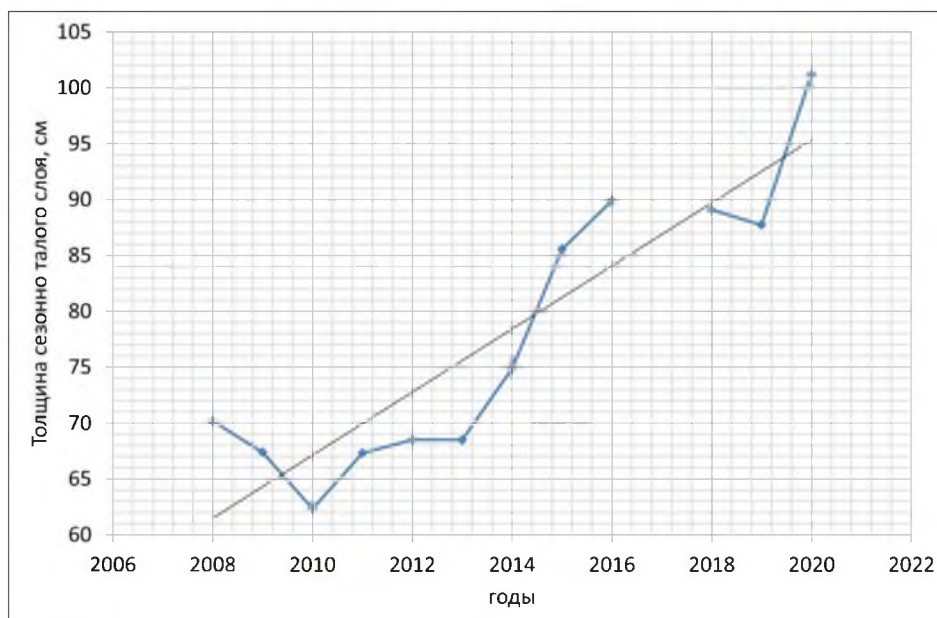


Рис. 11. Изменение максимальной толщины деятельного слоя на наблюдательной площадке CALM Игарка [7]

Расчёты толщины сезонно талого слоя производились по расчётной схеме для скорости движения фронта оттаивания. Схема учитывает оттаивание грунта сверху на массиве мёрзлого грунта в летний период на основе данных о ежедневной температуре воздуха. Уравнение теплового баланса записывалось как:

$$F_1 = cLV = cL \frac{dh_{th}}{dt}$$

или как:

$$\frac{dh_{th}}{dt} = V = F_1 / cL, \text{ где:}$$

$F_1$  – приток тепла через талый грунт к фронту оттаивания ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) из атмосферы;  
 $c$  – влагосодержание грунта ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $L$  – энергия фазового перехода воды ( $335 \text{ кДж}/\text{кг}$ );



$V = dh_{th}/d\tau$  - скорость движения фронта оттаивания (м/с);

$c L V = c L dh_{th}/d\tau$  - расход тепла на фазовый переход;

Тепловой поток к фронту оттаивания через талый грунт в атмосферу выражается согласно закону Фурье через теплопроводность и тепловой поток согласно данным справочника [8] как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{th} \frac{T_{возд}}{h_{th}}$$

Здесь  $T_{возд}$  – температура воздуха,  $h_{th}$  – толщина талого грунта, а  $\lambda_{th}$  – теплопроводность талого грунта, принятая равной 1,4 Вт/м °С [9].

Строилась разностная схема посредством аппроксимации выведенного дифференциального уравнения первого порядка по времени для изменения толщины талого слоя явным методом Эйлера:  $h_{th}(t_{n+1}) = h_{th}(t_n) + \Delta t V(t_n)$ . По полученной разностной схеме производятся расчёты изменения толщины талого слоя с шагом в один день и сравнение полученных результатов расчётов с данными фактических наблюдений.

Точное решение

$$h_{th} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th} \sum T_{возд}}{cL}}$$

Содержит корень квадратный из суммы положительных температур воздуха, помноженной на теплопроводность талого грунта и поделённой на теплоту фазового перехода.

Также поэтому минимум площади распространения морского льда в Арктике в августе-сентябре был второй по малости величины после 2012 года. А сентябрь, октябрь и ноябрь 2020 года были настолько аномально тёплыми (рис. 12), что в этом октябре и ноябре моря Карское, Восточно-Сибирское и Лаптевых установили рекорд минимума площади распространения льда за всю историю наблюдений с 1979 года, а море Лаптевых же впервые за всю историю наблюдений в октябре ещё не начало замерзать (рис. 13).

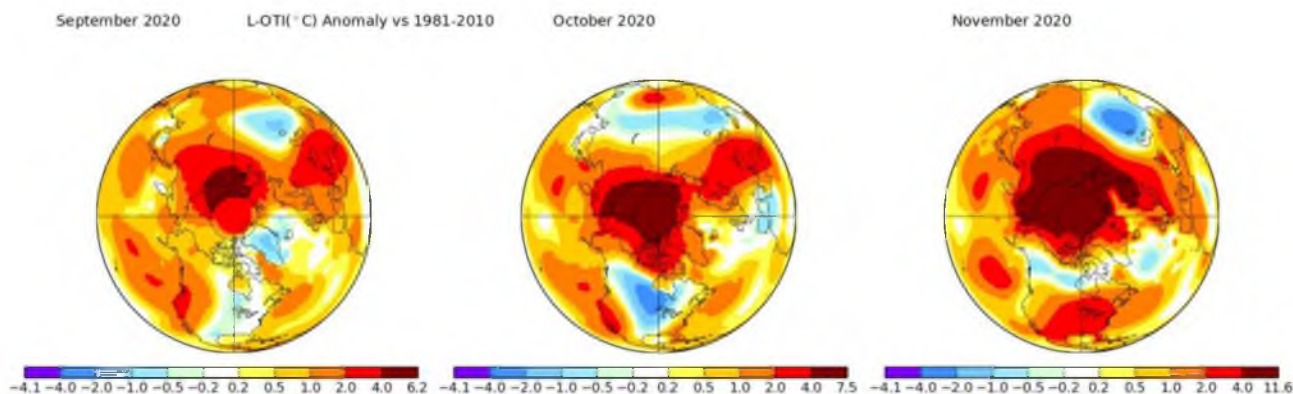


Рис. 12. Аномалии температуры воздуха в Северном полушарии в конце 2020 года относительно средних многолетних значений за 1981-2010 гг. [5]

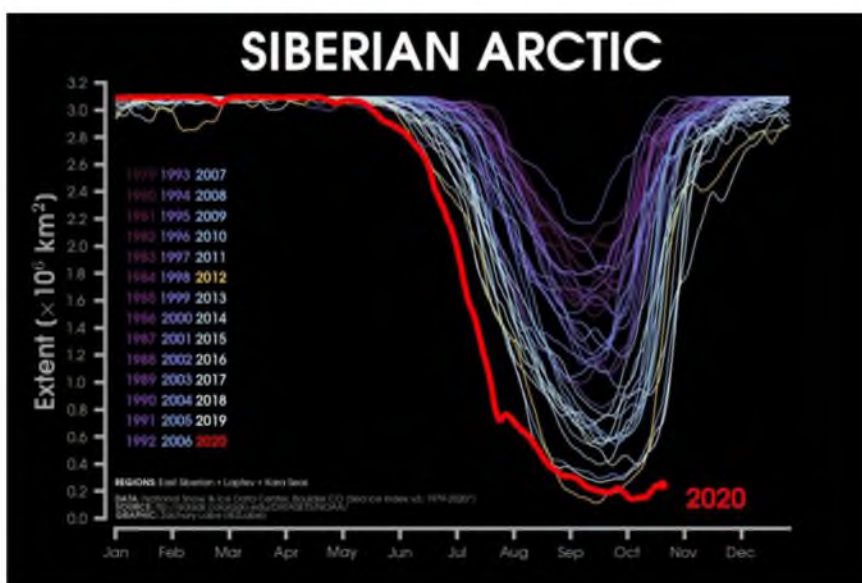


Рис. 13. Изменение минимальной площади распространения ледяного покрова в Арктике в 2020 г.

Таким образом, вообще же, прошедший 2020 год считается самым тёплым за всю историю наблюдений по данным метеообсерватории МГУ для Москвы, по данным Гидрометцентра для всей России и по данным Copernicus Climate Change Service (C3S) для всего Земного шара. При этом зимний сезон 2019/20 года в московском регионе был необычайно тёплым, и поэтому в зимний сезон 2019/20 года снега в московском регионе было мало. Однако тёплое лето 2020 года повлекло одно из самых минимальных летних значений площади морского льда в Арктике и как следствие аномально сильные минимальные температуры и обильные снегопады зимой 2020/21 года в Евразии и в Москве.

Хотя по данным Метеорологической обсерватории МГУ, октябрь 2020 года в Москве выдался самым тёплым за всю историю метеорологических наблюдений, которые ведутся уже 240 лет. В октябре 2020 года температура в среднем за месяц превзошла прежний рекорд 2008 года на целых полградуса и составила  $+9,45^{\circ}\text{C}$ , максимальная же температура достигала в один из дней двадцати градусов тепла. Примечательно, что в столице вплоть до начала ноября не было отмечено ни одного заморозка в воздухе, а на поверхности почвы температура лишь один раз опустилась до нулевой отметки.

Поэтому первый снег в Москве выпал только 19 ноября. Снег продолжал выпадать в Москве и в последующие дни. К понедельнику 23 ноября толщина снежного покрова на метеоплощадке МГУ составила около 15 см. Однако потом он в результате оттепели почти весь растаял.

К началу календарной зимы и на две первые недели декабря вследствие пришедшего на Европейскую территорию России мощного сибирского антициклона в Москве установились отрицательные температуры ( $-5^{\circ}$  –  $-6^{\circ}\text{C}$  – днём и  $-10^{\circ}$  –  $-12^{\circ}\text{C}$  ночью). Мощность снежного покрова в это время составляла 3–4 см, что повлекло интенсивное промерзание грунта вплоть до 30 см в Московской области.

*Работа выполнена по теме ГЗ «Опасность и риск природных процессов и явлений».*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018 / J. Pulliainen, K. Luojus, C. Derksen et al. // Nature. – 2020. – V. 581. – P. 294–298. DOI: 10.1038/s41586-020-2258-0

2. Сайт данных о распространении снежного покрова университета Rutgers. URL: <https://climate.rutgers.edu/snowcover/> (дата обращения 02.02.2021).
3. Сайт «Расписание погоды». URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 02.02.2021).
4. Сайт «Погода и Климат». URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения 02.02.2021).
5. Климатический сайт NASA. URL: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (дата обращения 02.02.2021).
6. Утечка дизельного топлива в Норильске // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Утечка\\_дизельного\\_топлива\\_в\\_Норильске](https://ru.wikipedia.org/wiki/Утечка_дизельного_топлива_в_Норильске) (дата обращения 02.02.2021).
7. Сайт данных наблюдения за толщиной активного слоя CALM. URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm> (дата обращения 02.02.2021)
8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
9. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. – М.: Изд-во МГУ, Наука, 2005. – 1024 с.

## REFERENCES

1. Pulliainen J., Luoju K., Derksen C. et al. Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018. *Nature*, 2020, vol. 581, pp. 294–298. DOI: 10.1038/s41586-020-2258-0
2. Rutgers University snow data website. Available at: <https://climate.rutgers.edu/snowcover/> (accessed 2 February 2021).
3. Weather and climate data website Rp5.ru. Available at: <https://rp5.ru> (accessed 2 February 2021).
4. Weather and climate data website. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru> (accessed 2 February 2021).
5. NASA climate data website. Available at: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (accessed 2 February 2021).
6. Utechka dizel'nogo topliva v Noril'ske [Diesel fuel leak in Norilsk]. *Wikipedia*. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Утечка\\_дизельного\\_топлива\\_в\\_Норильске](https://ru.wikipedia.org/wiki/Утечка_дизельного_топлива_в_Норильске) (accessed 2 February 2021).
7. CALM data website. Available at: <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm> (accessed 2 February 2021).
8. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperenosy* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Energiya, 1977. 334 p. In Rus.
9. Trofimov V.T. *Gruntovedenie* [Soil science]. Moscow, MSU Publishing, 2005. 1024 p. In Rus.

## Информация об авторе:

Фролов Денис Максимович, научный сотрудник, Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия, e-mail: [denisfrolov@mail.ru](mailto:denisfrolov@mail.ru)

Denis M. Frolov, scientific coworker, Geographical faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia, e-mail: [denisfrolov@mail.ru](mailto:denisfrolov@mail.ru)