

УДК 551.511.13

Методика расчета планетарной температуры в условиях установления циклов Миланковича

Д-р физ.-мат. наук Х. И. АБДУСАМАТОВ¹,
канд. техн. наук Е. В. ЛАПОВОК², д-р техн. наук С. И. ХАНКОВ²

¹abduss@gao.spb.ru, ²leva0007@rambler.ru

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН
196140, Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65

Составлена математическая модель, описывающая изменение во времени планетарной температуры Земли при ее движении по эллиптической траектории вокруг Солнца. Модель включает в себя уравнение нестационарного теплового баланса Земли, аналитическую зависимость солнечной постоянной от расстояния между Землей и Солнцем, а также аналитическое описание изменения во времени расстояния от Земли до Солнца в зависимости от эксцентриситета орбиты Земли и периода обращения Земли вокруг Солнца. По результатам расчета показано, что поскольку большую часть времени Земля движется вблизи области афелия, величина инсоляции поверхности Земли уменьшается с ростом эксцентриситета ее орбиты. По результатам расчетов установлено, что планетарная температура Земли мало изменяется в течение года при ее движении от перигелия к афелию, а средний уровень температуры понижается не более чем на 1,5 К при условии постоянства альбедо Бонда Земли. Существенное понижение планетарной температуры и наступление большого ледникового периода возможно только за счет действия положительной обратной связи, определяемой значительным увеличением альбедо Бонда вследствие увеличения площади ледового и снежного покрова на поверхности Земли. Динамика изменения планетарной температуры определялась при принятии допущения о постоянстве глубины активного слоя океана, равной 700 метров. Выбор значения глубины активного слоя влияет только на переходные тепловые процессы и не влияет средние значения уровней планетарной температуры.

Ключевые слова: циклы Миланковича, планетарная температура Земли, эллиптическая орбита, эксцентриситет, солнечная постоянная, альбедо Бонда.

Информация о статье

Поступила в редакцию 25.05.2016, принята к печати 08.07.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-3-82-86

Ссылка для цитирования

Абдусаматов Х. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Методика расчета планетарной температуры в условиях установления циклов Миланковича // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 82–86.

Planetary temperature calculations under Milankovitch cycles

D. Sc. H. I. ABDUSSAMATOV¹, Ph. D. Ye. V. LAPOVOK²,

D. Sc. S. I. KHANKOV²

¹abduss@gao.spb.ru, ²leva0007@rambler.ru

Pulkovo Observatory

196140, Russia, Saint-Petersburg, Pulkovskoye chaussee 65

A model for variation with time of the Earth's planetary temperature while the Earth is moving around the Sun along elliptical trajectory is presented. The model includes an equation for non-stationary heat balance of the Earth; analytical dependence of the solar constant on the distance between the Earth and the Sun; as well as analytical description for variation with time of a distance from the Earth to the Sun depending on the eccentricity of the Earth's orbit and Earth's rotation period around the Sun. The calculation shows that as the Earth is moving close to aphelion most of the time the insolation of the Earth's surface decreases when its orbit eccentricity increases. The Earth's planetary temperature is shown not to change significantly during the year while The Earth is moving from perihelion to aphelion, and the average temperature is shown to decrease by 1.5 K as a maximum if Bond's albedo of the Earth remains constant. A significant decrease of planetary temperature and an ice age might be possible only if ice-albedo positive feedback takes place when Bond's albedo increases due to an increase of ice and snow cover of the Earth's surface. The dynamic of planetary temperature change was calculated assumed that the active layer of the ocean remained constant i.e. 700 m. The selection of active layer depth influences transient thermal processes only and does not influence an average planetary temperature.

Keywords: Milankovitch cycles, planetary temperature of the Earth, elliptic orbit, eccentricity, solar constant, Bond's albedo.

Введение

Концепция орбитальной или астрономической теории палеоклимата впервые была сформулирована М. Миланковичем [1, 2]. Суть этой теории заключается в том, что существенное и даже определяющее влияние на климат Земли оказывают параметры орбиты Земли при ее движении вокруг Солнца, и в первую очередь — эксцентриситет орбиты. При этом величина большой полуоси эллипса остается неизменной, а величина его малой полуоси уменьшается. Как отмечалось в работах [3, 4], увеличение эксцентриситета орбиты должно приводить к уменьшению инсоляции вблизи точки апогея (афелия) орбиты, поскольку вблизи афелия скорость Земли минимальна и ее движение замедляется. Однако в [5] утверждалось, что ввиду уменьшения величины малой полуоси эллипса Земля большее время оказывается на минимальном расстоянии от Солнца, поэтому был сделан вывод об увеличении среднегодовой инсоляции с увеличением эксцентриситета орбиты. Циклам Миланковича, критике и доработке этой теории посвящено большое количество литературы [6–17]. Однако методика расчетов планетарной температуры в условиях реализации циклов Миланковича до настоящего времени отсутствует, поэтому рассуждения носят в основном качественный характер.

Целью данной работы являлось определение планетарной температуры Земли при ее движении по эллиптической траектории с различными эксцентриситетами от точки перигея (перигелия) к точке апогея (афелия). При этом из трех факторов циклов Миланковича нами исследовался только один, поддающийся аналитическому исследованию, но при этом наиболее существенно влияющий на планетарную температуру — эксцентриситет орбиты.

Актуальность решения сформулированной задачи определяется тем, что в литературе до настоящего времени обсуждались лишь вопросы влияния параметров орбиты Земли на ее инсоляцию, а вопросы формирования планетарной температуры, определяющей климат в глобальном масштабе, до сих пор оставались неизученными. Вместе с тем, к настоящему времени разработаны методики расчетов средних температур космических объектов, движущихся по эллиптическим орбитам [18, 19], причем в работе [19] представлено весьма точное и простое аналитическое описание зависимости расстояния от объекта до гравитирующей массы, выраженное через параметры орбиты. Это позволяет использовать готовый математический аппарат для определения нестационарной средней по поверхности температуры объекта. Это может быть применено для вычислений планетарной температуры Земли при заданном эксцентриситете ее орбиты.

Физическая модель

При исследовании влияния эксцентриситета орбиты Земли на ее планетарную температуру Земля принимается изотермическим шаром, энергетический баланс которого определяется усредненными по его поверхности величинами поглощенной солнечной энергии и излучен-

ной в космическое пространство собственной тепловой энергии, а также величиной изменения теплосодержания, вызванного изменением расстояния до Солнца в процессе движения по эллиптической траектории.

Математическая модель

В рамках принятой физической модели энергетический баланс Земли может быть описан нестационарным дифференциальным уравнением теплообмена вида

$$C_s \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon \sigma T^4 = Q; \quad (1)$$

$$C_s = (1 + 0,42H) \cdot 10^7; \quad Q = \frac{(1 - A)E}{4},$$

где C_s — поверхностная плотность теплоемкости Земли как планеты (с учетом океана и атмосферы), Дж/(м²·К); T — планетарная температура Земли; τ — текущее время; ε — степень черноты поверхности Земли; σ — постоянная Стефана — Больцмана, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); A — альбедо Бонда Земли; E — солнечная постоянная; H — глубина активного слоя океана.

Значения параметров уравнения (1), реализуемых в настоящее время, равны: $A = 0,3$; $Q = 239$ Вт/м²; $\varepsilon = 0,648$ [20]. С учетом этих значений параметров, планетарная температура в равновесном тепловом состоянии будет равна $T = T_p = 284$ К при условии, что Земля движется вокруг Солнца по строго круговой орбите, когда эксцентриситет орбиты равен нулю. В настоящее время эксцентриситет орбиты Земли равен $e = 0,0167$, что приводит к снижению планетарной температуры, усредненной за период обращения вокруг Солнца, поэтому фактическое значение планетарной температуры определяется из нестационарного уравнения (1).

Все указанные величины параметров соответствуют усредненному по времени значению солнечной постоянной $E = 1366$ Вт/м². Такое значение обычно используется в практических расчетах энергетического баланса как движущихся по околоземной орбите космических объектов, так и самой Земли при ее движении вокруг Солнца. Однако известно, что Земля движется вокруг Солнца не по круговой, а по эллиптической орбите с небольшим эксцентриситетом. Поэтому величина, условно называемая солнечной постоянной, не является строго постоянной, а изменяется в небольших пределах, причем ее максимальное значение реализуется, когда в северном полушарии наступает зима, а минимальное достигается в летний период в северном полушарии.

Солнечная постоянная на удалении от поверхности Солнца на изменяющемся во времени расстоянии h (τ) может быть определена из соотношения

$$E = \left[\frac{R_s}{h(\tau)} \right]^2 M; \quad M = \sigma T_s^4, \quad (2)$$

где R_s — радиус Солнца, $R_s = 0,696342 \times 10^9$ м; T_s — температура поверхности Солнца, $T_s = 5778$ К; M — энергетическая светимость Солнца, $M = 6,32 \times 10^7$ Вт/м².

При движении Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите с относительно небольшим эксцентриситетом ($e < 0,1$) расстояние между поверхностями Солнца

и Земли можно с малой погрешностью описать гармонической функцией вида [19]

$$h(\tau) = h_p + (h_a - h_p) \left| \sin \left(\pi \frac{\tau}{t_0} \right) \right|, \quad (3)$$

где h_p и h_a — величины перигея и апогея орбиты Земли вокруг Солнца соответственно; t_0 — период обращения Земли вокруг Солнца.

На основании данных работы [19] формулу (3) можно записать через величины эксцентриситета орбиты и ее большую полуось a в следующем виде

$$h(\tau) = (1 - e)a + 2ea \left| \sin \left(\pi \frac{\tau}{t_0} \right) \right|. \quad (4)$$

Величина большой полуоси эллипса, описывающего орбиту Земли вокруг Солнца, во всех ситуациях постоянна и равна $a = 1,5 \times 10^{11}$ м. Дальнейшие расчеты проводились для двух значений эксцентриситета: $e = 0,0167$, реализуемого ныне, и $e = 0,0658$, что соответствует эксцентриситету, который Миланкович предположил в случае реализации глубокого климатического минимума [1, 2].

Для указанных двух значений эксцентриситета расстояния между Солнцем и Землей описываются, соответственно, формулами со следующими количественными значениями коэффициентов

$$h(\tau) = \left[1,475 + 0,05 \left| \sin \left(\pi \frac{\tau}{t_0} \right) \right| \right] \cdot 10^{11} \quad (5)$$

$$h(\tau) = \left[1,4 + 0,1974 \left| \sin \left(\pi \frac{\tau}{t_0} \right) \right| \right] \cdot 10^{11} \quad (6)$$

Период обращения Земли вокруг Солнца t_0 описывается формулой, приведенной в работах [18, 19]:

$$t_0 = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM_S}}, \quad (7)$$

где M_S — гравитирующая масса Солнца, $M_S = 2 \times 10^{30}$ кг; G — гравитационная постоянная, $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Нм²/кг².

После подстановки в формулу (7) всех значений параметров получаем значение $t_0 = 3,14 \cdot 10^7$ с. Определение периода с такой точностью достаточно для целей дальнейших расчетов.

Зависимости от времени расстояний от Земли до Солнца вычислялись по формулам (5) и (6), а удельные световые потоки солнечного излучения рассчитывались по формуле (2). Затем вычисленные значения $E(\tau)$ подставлялись в Q , входящее в уравнение (1), из которого определялась планетарная температура.

На рис. 1 показаны зависимости от времени движения по эллиптическим орбитам величин расстояний от Солнца до Земли, а на рис. 2 — зависимости от времени величины так называемой «солнечной постоянной», соответствующие данным рис. 1. Она названа так условно, поскольку плотность мощности солнечного излучения, падающая на верхнюю границу атмосферы Земли,

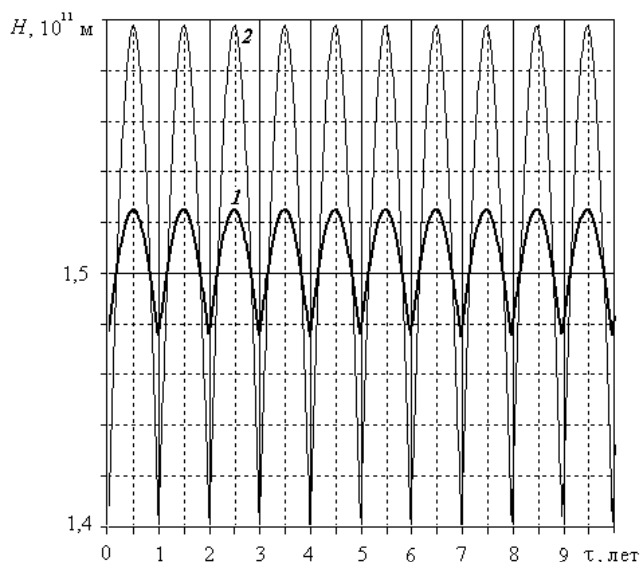


Рис. 1. Периодические колебания расстояния от Солнца до Земли в течение произвольно выбранных десяти лет при значениях эксцентриситета орбиты Земли:

1 — $e = 0,0167$; 2 — $e = 0,0658$

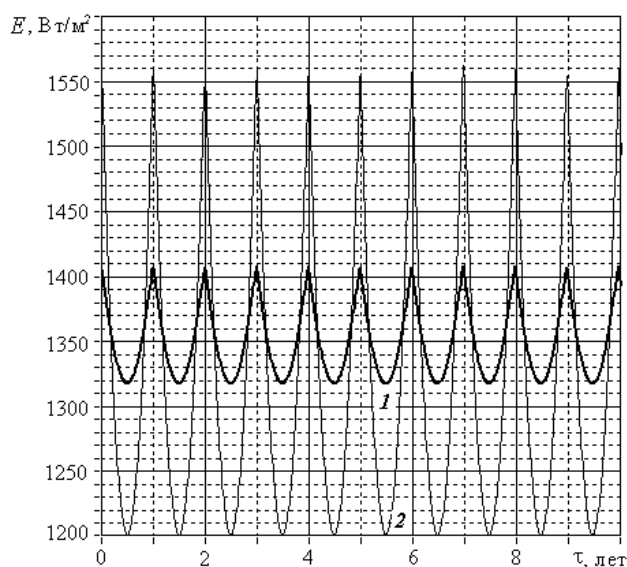


Рис. 2. Периодические колебания солнечной постоянной при значениях эксцентриситета орбиты Земли:

1 — $e = 0,0167$; 2 — $e = 0,0658$

зависит от расстояния между Землей и Солнцем, а значит — от времени.

В дальнейших расчетах использовалось как постоянное значение альбедо Бонда $A = 0,3$ [20], так и значение, которое на 10% выше, то есть $A = 0,33$. В последнем случае оценивалось влияние положительной обратной связи, когда понижение планетарной температуры Земли приводит к увеличению площади ледового и снежного покрова. Значение планетарной температуры вычислялось также для предельного случая, когда вся площадь поверхности Земли была бы покрыта льдом. В этом гипотетическом случае величина альбедо Бонда определялась из соотношения [21]:

$$A = A_a + (1 - A_a) A_s \beta, \quad (8)$$

где A_a — альbedo атмосферы; A_s — альbedo земной поверхности; β — пропускание атмосферы в спектре солнечного излучения.

В настоящее время значения параметров, входящих в формулу (8), равны $A_a = 0,225$; $A_s = 0,15$; $\beta = 0,747$. Из формулы (8) следует, что в гипотетическом случае, когда альbedo поверхности Земли достигнет предельного значения $A_s = 1$, а остальные параметры останутся неизменными, предельная величина альbedo Бонда Земли составит $A = 0,804$. В тепловых расчетах величина активного слоя океана принималась равной $H = 700$ м. Эта величина определяет полную теплоемкость океана и влияет только на длительность переходных процессов и не влияет на уровень планетарной температуры.

Варианты значений эксцентриситетов орбиты и альbedo Бонда Земли были использованы в расчетах планетарной температуры. Результаты этих расчетов показаны в таблице.

Значение планетарных температур на квазиустановившихся временных участках траектории движения Земли вокруг Солнца

Значения параметров, определяющих климат		Планетарная температура	
эксцентриситет орбиты Земли	альbedo Бонда	максимальная	разность между максимальной и минимальной температурой
0,0167	0,3	283,2	0,02
0,0658	0,3	281,8	0,09
	0,33	278,8	0,09
	0,8	205	0,02

Выводы

На основании полученных данных, представленных в таблице, только существенное увеличение альbedo Бонда Земли может служить действенным фактором глобального похолодания. При отсутствии указанного фактора как инструмента положительной обратной связи понижение температур вследствие увеличения эксцентриситета орбиты Земли не будет приводить к понижению планетарной температуры более, чем на 1,5 К, что сопоставимо с влиянием вариаций солнечной постоянной, приводящим совместно с изменением альbedo Бонда к малому ледниковому периоду.

Литература (References)

1. Milankovitch M. Kanon der Erdbestrahlungen und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem Belgrade. 1941. (New English Translation: Canon of Insolation and the Ice Age Problem. With introduction and biographical essay by Nikola Pantic. Hardbound. Alven Global. 1998. 636 pp.)
2. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебания климата. — М.; Л.: ГОНТИ, 1939, 207 с. [Milankovich M. Mathematical climatology and astronomical theory of fluctuation of climate. Moscow, Leningrad: GONTI, 1939, 207 p. (in Russian)]

3. Абдусаматов Х. И. Солнце диктует климат Земли. — СПб.: Logos, 2009. 197 с. [Abdussamatov H. I. The sun dictates climate of Earth. St. Petersburg: Logos, 2009. 197 p. (in Russian)]
4. Абдусаматов Х. И. Глубокий минимум мощности солнечного излучения приведет к Малому ледниковому периоду. — СПб.: Нестор-История, 2013. 246 с. [Abdussamatov H. I. The deep minimum of power of sunlight will lead to Small Ice Age. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013. 246 p. (in Russian)]
5. Большаков В. А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата. Под редакцией К. Я. Кондратьева. — М.: МГУ, 2003, 256 с. [Bol'shakov V. A. New concept of the orbital theory of a paleoklimat. Under K. Ya. Kondratyev's edition. Moscow: MGU, 2003, 256 p. (in Russian)]
6. Wunsch Carl. Quantitative estimate of the Milankovitch-forced contribution to observed Quaternary climate change. *Quaternary Science Reviews*, 2004, vol. 23, pp. 1001–1012.
7. Broecker W. S. Climate cycles — upset for Milankovitch theory. *Nature*. 1992, vol. 359, pp. 779–780.
8. Hays J. D., Imbrie J., Shackleton N. J. Variations in the Earth's orbit, pacemaker of the ice ages. *Science*. 1976, vol. 194, pp. 1121–1132.
9. Imbrie J., Imbrie J. Z. Modeling the climatic response to orbital variations. *Science*. 1980, vol. 207, pp. 943–953.
10. Karner D. B., Muller R. A. A causality problem for Milankovitch. *Science*, 2000, vol. 288, pp. 2143–2144.
11. Ruddiman W. F. Earth's Climate. Past and Future. W. H. Freeman, New York, 2001, 465 p.
12. Saltzman B. Dynamical Paleoclimatology. Generalized Theory of Global Climate Change. Academic Press, San Diego, 2002, 354 p.
13. Ashkenazy Y., Eisenman I., Gildor H., Tziperman E. The Effect of Milankovitch Variations in Insolation on Equatorial Seasonality. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, pp. 6133–6142.
14. Berger A. Long-term variations of daily insolation and quaternary climate changes. *J. Atmos. Sci.*, 1978, vol. 35, pp. 2362–2367.
15. Петрович А. Канон ледникового периода. Милутин Миланкович и астрономическая теория изменений климата. — СПб.: Нестор-История, 2011. 132 с. [Petrovich A. Canon of Ice Age. Milutin Milankovich and astronomical theory of climate changes. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. 132 p. (in Russian)]
16. Федулов К. В., Астафьева Н. М. Структура климатических изменений (по палеоданным и данным инструментальной эпохи). — М.: ИКИ РАН, 2008. 60 с. [Fedulov K. V., Astaf'eva N. M. Structure of climatic changes (on paleodanny and this an instrumental era). Moscow: IKI RAN, 2008. 60 p. (in Russian)]
17. Гончаров М. А. В. Е. Хаин и проблема суперконтинентальной цикличности // Международная конференция «Современное состояние наук о Земле» 1–4 февраля 2011, — М.: МГУ, 2011. с. 456–460. [Goncharov M. A. V. E. Khain and problem of supercontinental recurrence. International conference «Current State of Sciences about Earth» on February 1–4, 2011. Moscow: MGU, 2011. p. 456–460. (in Russian)]
18. Баева Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Методика расчета нестационарных температур космического объекта, движущегося по эллиптической орбите. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (86), с. 67–72. [Baeva Yu. V., Lapovok E. V., Khankov S. I. Method of calculation of non-stationary

- temperatures of the space object moving on an elliptic orbit. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2013. No 6 (86), p. 67–72. (in Russian)]
19. Дзитоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитическая методика расчета нестационарной температуры сферического космического объекта при его движении по полярной эллиптической орбите // Труды ВКА имени А. Ф. Можайского. 2014. № 2 (643). С. 98–106. [Dzitoev A. M., Lapovok E. V., Khankov S. I. Analytical method of calculation of non-stationary temperature of spherical space object at his movement on a polar elliptic orbit. *Trudy VKA imeni A. F. Mozhaiskogo*. 2014. No 2 (643). p. 98–106. (in Russian)]
 20. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Keihl J. Earth's global energy budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2009. No 3. V. 90. P. 311–323.
 21. Абдусаматов Х. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Мониторинг энергетического баланса Земли из точки Лагранжа L1 // Оптический журнал. 2014. т. 81, № 1, с. 25–31. [Abdusamatov Kh. I., Lapovok E. V., Khankov S. I. Monitoring of power balance of Earth from Lagrange's point of L1. *Opticheskii zhurnal*. 2014. Vol. 81, No 1, p. 25–31. (in Russian)]

Малышеву Александру Александровичу — 70 лет



Александр Александрович Малышев родился 1 октября 1946 г. в г. Ленинграде. После окончания в 1970 г. Ленинградского института холодильной промышленности, три года работал в оборонной промышленности, а в 1973 г. вернулся в родной институт на кафедру Теоретических основ тепло- и хладотехники. Работал А. А. Малышев на кафедре инженером, младшим научным сотрудником, затем учился в аспирантуре и защитил в 1982 г. кандидатскую диссертацию.

А. А. Малышев — ученик Всемирно-известного ученого — Галины Николаевны Даниловой, под руководством которой было начато новое направление теплофизики двухфазных потоков, включающее комплексное исследование локального теплообмена, режимов течения и скольжения фаз.

С 1984 г. работал начальником научно-исследовательского сектора, а в 2000 г. назначен на должность проректора по научной и инновационной деятельности, на которой успешно проработал до 2010 г. В настоящее время А. А. Малышев заведует кафедрой Холодильных машин и низкопотенциальной энергетики Университета ИТМО. В течение ряда лет А. А. Малышев является научным руководителем госбюджетных НИР, выполняемых по госзаказу и посвященных фундаментальным проблемам теплообмена в аппаратах низкотемпературных установок.

Под его непосредственным руководством выполнялись хозяйственные проекты, связанные с разработкой и внедрением низкотемпературных установок на судах и в системах специального назначения.

На данный момент под руководством профессора А. А. Малышева на кафедре развиваются комплексные исследования теплогидродинамических процессов при фазовых переходах хладагентов в теплообменных аппаратах нового поколения. Совместно с Университетом Штата Иллинойс в Урбане-Шампейн, Рижским техническим университетом, кафедрами Холодильных машин и низкопотенциальной энергетики и Инженерного проектирования выполняется международный проект, связанный с фундаментальными исследованиями фазовых переходов в миниканальных теплообменниках. А. А. Малышев автор более 60 научных работ, пособий, статей по проблемам в области тепло- и массообмена при кипении хладагентов.

Александр Александрович исключительно добросовестный, высококвалифицированный специалист, надежный, искренний, доброжелательный и отзывчивый товарищ и коллега. Он заслуженно пользуется авторитетом и уважением в коллективе университета и среди членов Международной академии холода.

*Президиум Международной академии холода, редколлегия журнала «Вестник МАХ»
сердечно поздравляют Вас, Александр Александрович, с юбилеем!
Желаем крепкого здоровья, энергии, творческого задора,
новых профессиональных достижений и благополучия в семье!*