

## О роли ледников в процессах потепления климата

П.Г. Ковадло<sup>1</sup>, А.Ю. Шиховцев<sup>1</sup>, С.А. Язев<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория Иркутского государственного университета  
664009, г. Иркутск, ул. Советская, 119а

Поступила в редакцию 8.11.2021 г.

Анализируется процесс повышенного по сравнению с другими регионами темпа потепления Северного Ледовитого океана и примыкающих к нему областей. Видимый аспект причины этого явления заключается в уменьшении средней толщины океанического льда и, как следствие, увеличении потока тепла от воды через лед, который подогревает нижний слой воздуха. Особенно это проявляется в холодный период года. Кроме этого, в процессе потери ледяной массы многолетних плавающих ледников затраты тепла на их таяние уменьшаются. В совокупности эти факторы обеспечили современный рост температуры в приполюсной зоне — в линейном приближении больше 8°. Отметим, что воздушный межширотный обмен теплом при этом не прогрессирует ввиду уменьшения меридиональных температурных градиентов.

*Ключевые слова:* климат, температура, темп потепления, теплосодержание, таяние льдов; climate, temperature, rate of warming, heat content, melting ice.

### Введение

Повышение температуры приповерхностного слоя воздуха в масштабах всей Земли к настоящему времени достоверно выявлено путем количественного анализа архивных данных, полученных за последние 150 лет метеорологическими службами в результате систематических наблюдений атмосферных параметров [1]. По отдельным станциям имеются 300-летние ряды наблюдений. Наиболее чувствительными к повышению температуры, наряду с некоторыми другими природными объектами, оказались многолетние льды. Как было замечено еще в начале XX в. в ходе полярных экспедиций, плавающая часть льдов Северного Ледовитого океана (СЛО) в отдельных регионах стала сокращаться. Позднее это явление стало подтверждаться накопленными эпизодическими сведениями. В некоторых исследованиях отмечалось увеличение высоты снеговой линии в горных массивах с многолетними ледниками. Однако указанные тенденции в те времена трудно было отнести к систематическим. Например, наступали периоды длительного похолодания и казалось, что природная система возвращалась в исходное состояние.

В настоящем исследовании рассматривается ускоренный рост приповерхностной температуры воздуха в регионе Северного Ледовитого океана и окружающих территорий и обосновывается связь этого явления с динамикой разрушения плавающих ледников.

### Используемые данные и методы анализа

На рис. 1 показаны не сглаженные по годам изменения температуры воздуха в широтной зоне 80–90° Северного полушария в период с 1948 г. по настоящее время по данным архива NCEP/NCAR [2]. Прямой обозначен тренд, который показывает, что приrost температуры составил более 8°. Можно отметить присутствие некоторой цикличности в вариациях температуры на фоне общего роста. В период с 1975 по 1995 г. в изменениях наблюдалась пауза с небольшим снижением температуры, после которой началось новое устойчивое потепление. Эти циклические изменения, с нашей точки зрения, относятся к внутрисистемным характеристикам региона. Их можно воспринимать как суперпозицию сезонных (фиксированных коротких) колебаний температуры и длительных по времени процессов разрушения (таяния) многолетних льдов. При этом вынос разрушенной ледовой массы с акватории океана лимитируется размерами и гидродинамическими параметрами Гренландско-Скандинавского и Берингова проливов. С увеличением ледовой массы (особенно в форме айсбергов) возникают многолетние заторы, и пропускная способность проливов уменьшается, помимо того, что она в целом имеет сезонный характер. Неравномерный вынос льдов с акватории СЛО является переменным (циклическим) охлаждающим фактором в умеренных и высоких широтах Северного полушария. Отметим также, что по мере таяния объем ледовой массы сокращается, уменьшаются и затраты тепла на таяние ее остатков.

Как показано в [3], темп повышения температуры воздуха в разных широтных зонах различен.

\* Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru);  
Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@rambler.ru);  
Сергей Артурович Язев (syazev@gmail.com).

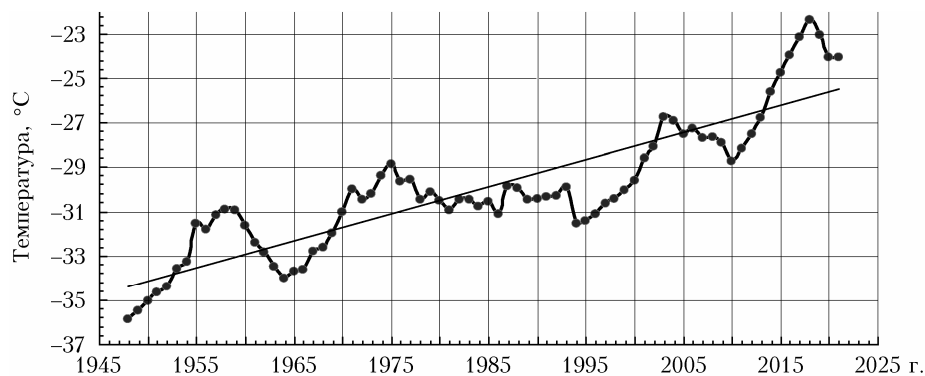


Рис. 1. Изменение средних многолетних значений температуры в приземном слое воздуха в январе в широтной зоне 80–90° с.ш.; прямая – тренд изменения температуры

Прирост температуры при смещении к экватору снижается до  $0,2^\circ$  в приэкваториальных широтах. Слабый прирост температуры от экватора до  $45^\circ$  с.ш. в значительной степени можно объяснить более равномерным прогревом этих широт в течение года, а также большей поверхностью океана и его высокой тепловой инерцией по сравнению с площадью континента: начиная с  $50^\circ$  с.ш. площадь суши в Северном полушарии начинает преобладать над площадью океана. В полярном секторе темп потепления за указанный период времени возрастает до  $5^\circ$ . Следует заметить, что полярная область при отсутствии притока солнечной радиации (на протяжении  $\sim 186$  сут) обогревается практически только за счет переноса тепла из низких широт атмосферными и океаническими течениями. Поэтому закономерен следующий вопрос. Если причина глобального роста температуры общая для всей планеты, почему темп прогрева полярных областей выше, чем экваториальных? Более того, зимой температура воздуха в приполярной области в последние годы в среднем оказывается выше, чем это наблюдалось в 40-е гг. XX в. Отметим, что описанный феномен имеет место и в южных полярных областях, хотя выражен слабее.

Для увеличения температуры требуется дополнительное тепло. Рис. 1 демонстрирует, что температура воздуха в секторе  $80\text{--}90^\circ$  с.ш. в январе выросла несмотря на отсутствие притока прямой солнечной радиации. Из этого следует, что средняя годовая температура повышается за счет изменения режима тепловой системы этого региона. Для понимания механизма притока дополнительного тепла в полярную область в многолетнем плане возникает задача раздельной оценки атмосферного и океанического притоков тепла с учетом изменения внешних условий.

Перенос тепла воздушными течениями из низких широт в полярные в гидродинамическом представлении зависит от разности температур между этими широтами. При более высоком темпе роста температуры в высоких широтах, как показано выше, межширотные разности температуры снижаются, следовательно, ослабевает и тепломассообмен. Другими словами, потоки атмосферного тепла в высокие широты уменьшаются.

Таким образом, уже качественный анализ показывает, что при прочих равных условиях атмо-

сферные течения ввиду их ослабления не могут обеспечить наблюдаемый прирост температуры. Более сложным представляется механизм транзита тепла в полярные регионы океаническими течениями, если учесть, что СЛО в течение длительного периода покрыт многолетним и сезонным льдом, изолирующим прилегающий воздух от прямого контакта с водной поверхностью (исключая, конечно, полыньи, разводья и трещины).

Как было сказано выше, плавучие льды наиболее чувствительны к изменениям температуры окружающей среды. Их параметры роста и разрушения, а также гидродинамические характеристики реагируют как на сезонные, так и на многолетние колебания температуры прилегающего воздуха и, что более важно, на вариации температуры глубинных слоев океанической воды. Напомним, что температура подледного слоя воды составляет зимой  $-1,7 \div -1,8^\circ\text{C}$ , поднимаясь до  $-1,5^\circ\text{C}$  летом [4]. На глубинах более 200–250 м находится слой мощностью 400–800 м с положительной температурой (примерно  $+1,5^\circ\text{C}$ ) и повышенной соленостью. Этот слой подпитывается проникающими в СЛО теплыми атлантическими течениями и на протяжении всего года играет важную роль в механизмах теплообмена. Более того, атмосферные течения, поступающие в СЛО со стороны континентов в январе, оказываются холоднее, чем воздушная масса над океаном. Их температура при взаимодействии с ледяным покровом повышается. Отметим, что в это время года единственным источником тепла на высоких широтах являются теплые воды Атлантики и в меньшей степени воды Тихого океана, проникающие в СЛО. Подогретые воздушные течения это тепло переносят и на прилегающие территории, смягчая климат.

С уменьшением среднегодового прироста объема льда в холодный период толщина плавающей части ледяного покрова уменьшается. Следовательно, увеличивается поток тепла сквозь лед, который подогревает нижние слои воздуха, а также компенсирует затраты тепла, излучаемого подстилающей поверхностью.

На рис. 2 по данным архива PIOMAS (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System [5]) показана средняя годовая динамика уменьшения объема плавучих льдов СЛО за период 1979–2020 гг.

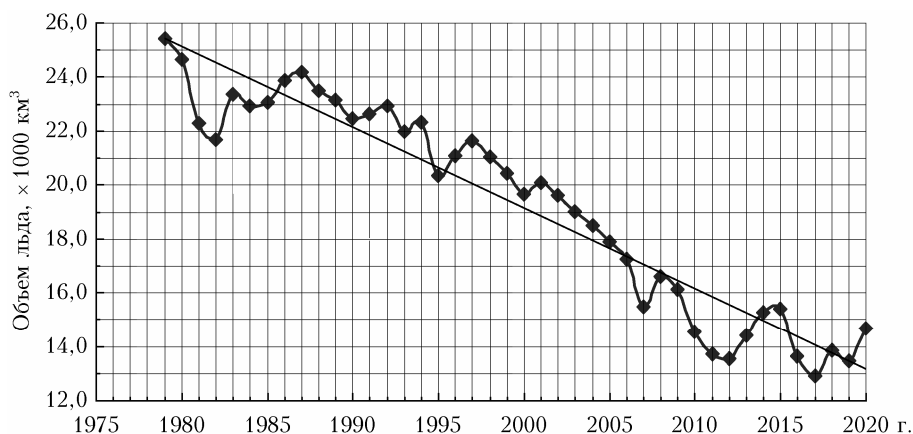


Рис. 2. Динамика разрушения плавучих льдов на территории СЛО за 1979–2020 гг.

Для оценки средней годовой толщины сохранившегося плавающего льда воспользуемся численными оценками плавающего ледового покрова СЛО из литературных источников. Известно, что толщина плавающих льдов – величина переменная, поэтому будем использовать для анализа ее среднегодовые и среднемесячные значения, полученные из наблюдений, приведенных, например, в [6, 7]. Среднегодовая площадь льда СЛО за 1979–2020 гг., по данным НАСА, уменьшилась на  $\sim 2,9 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  (с  $10,8 \cdot 10^6$  до  $7,9 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ ). Объем льда за этот период уменьшился (рис. 2) на  $10,4 \cdot 10^3 \text{ км}^3$  (с  $24,1 \cdot 10^3$  до  $13,7 \cdot 10^3 \text{ км}^3$ ). Осредненная для всей площади характерная толщина льда в начале периода (1979 г.) составляла 2,23 м. Средняя толщина оставшегося к 2020 г. льда сократилась до  $\sim 1,73$  м. Таким образом, толщина льда за 41 год уменьшилась на  $\sim 0,5$  м. Приблизительно это соответствует толщине однолетнего стаивания сплоченного льда на широте  $\sim 80^\circ$  с.ш. [4]. Полученные оценки соответствуют аналогичным из [8, 9].

Согласно приведенным выше данным, с 1979 по 2020 г. в акватории СЛО растаяло  $10,4 \cdot 10^3 \text{ км}^3$  ледовой массы. Это означает, что затраты тепла на таяние  $10,4 \cdot 10^3 \text{ км}^3$  льда за 41 год составили  $3,763 \cdot 10^{21}$  Дж. Таким образом, экономия тепловой

энергии, затрачиваемой в Северном полушарии на таяние плавучих льдов ежегодно,  $- 91,8 \cdot 10^{18}$  Дж. Отсюда следует, что сэкономленное тепло, приносимое океаническими и атмосферными течениями из низких широт, затрачивается на обогрев системы «атмосфера – океан» в полярной области. В результате этого процесса увеличивается температура нижних слоев тропосферы. Динамика роста тепловой энергии системы «океан – атмосфера» за счет снижения затрат на таяние плавучей части ледяного покрова СЛО за период 1979–2020 г. приведена на рис. 3. Рост теплосодержания в системе составил  $36,7 \cdot 10^{20}$  Дж, среднегодовая температура повысилась на  $3,5^\circ$ , а накопленная мощность излучения составила  $8,5 \text{ Вт/м}^2$ .

Следовательно, льда ежегодно становится меньше, а значит меньше оказывается и «депонированного» льдом «холода». Если разрушение многолетнего ледяного покрова будет продолжаться, то затраты тепла на дальнейшее таяние будут продолжать уменьшаться с каждым годом. На рис. 4 показана расчетная динамика уменьшения затрат тепла на таяние льдов. С учетом 41-летнего тренда уменьшения объемов льда в линейном приближении к 2065 г. многолетние льды разрушатся и процесс потепления замедлится. Однако такой сценарий маловероятен,

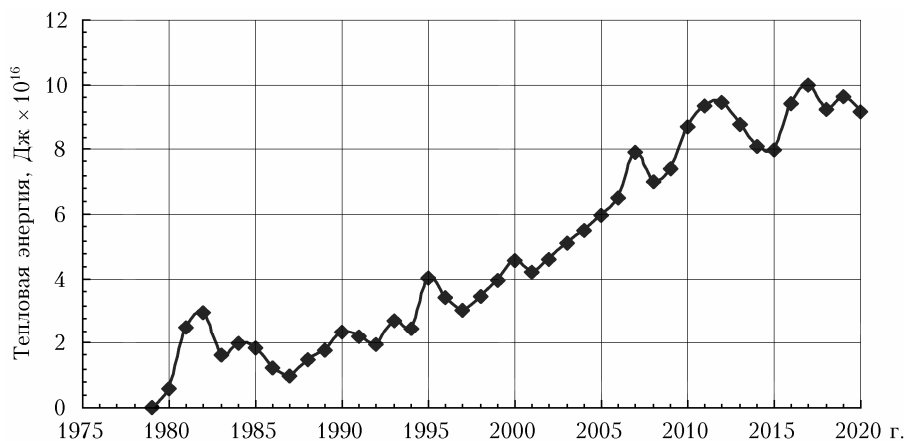


Рис. 3. Рост тепловой энергии системы «океан – атмосфера» за счет снижения затрат на таяние льда в СЛО за период 1979–2020 гг.

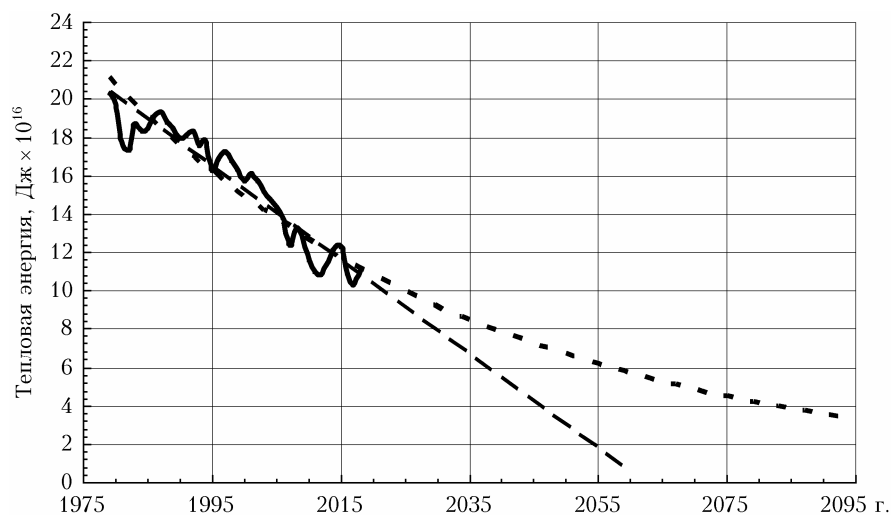


Рис. 4. Динамика затрат тепловой энергии на таяние льда (по исходным данным архива PIOMAS): сплошная линия — за период 1979–2020 гг., штриховая (в линейном приближении) — расчет до 2065 г., пунктирная — до 2095 г. и далее с учетом нелинейной компоненты реального изменения затрат тепла за период 1979–2020 гг.

поскольку на территории СЛО накоплен огромный запас ледниковой массы, включая континентальные ледники, который также требует для таяния больших тепловых ресурсов. Поэтому на быстрое повышение температуры за счет снижения затрат тепла рассчитывать нельзя. Достаточно сказать, что объем только Гренландского ледника почти в 20 раз превышает объем многолетних плавающих льдов. Поэтому темпы таяния, а следовательно, и потепления будут замедляться. Однако этот вопрос выходит за рамки обсуждаемой проблемы.

Кратко укажем возможные причины таяния полярных льдов Северного полушария, которые были связаны, скорее, с похолоданием, чем с потеплением климата [10]. Рост существовавшего в прошлом гигантского Панарктического ледника на территории Северного полушария остановился после того, как под действием собственной тяжести (высота ледового щита доходила до нескольких километров, и его оставшийся фрагмент — Гренландский сухопутный ледник — доказывает это) на отдельных территориях земная кора просела, образовав и углубив проливы, которые увеличили доступ теплых атлантических и тихоокеанских вод к СЛО. Отдельные южные части ледника, попавшие под действие теплой воды, стали разрушаться. Этот процесс продолжается и сегодня. Захлаживающее действие арктического ледника по мере уменьшения его объема постепенно ослабевает.

Следует заметить, что даже в недалеком прошлом при разрушении ледников появлялось много айсбергов, которые выносились течениями в низкие широты и активно влияли на температуру воды и воздуха. При интенсивном разрушении ледяного щита проливы временами блокировались выносимым льдом, тепла в акваторию СЛО поступало меньше: остаточная ледовая масса нарастала до тех пор, пока теплые течения не освобождали проливы. Эти циклические процессы с характерными временами от нескольких десятков до сотен, а на начальной ста-

дии и тысяч лет активно влияли не только на климат прилегающих территорий, за счет атмосферных течений их влияние приобретало глобальный характер.

Таким образом, можно полагать, что в прошлом в полярных широтах лед накапливался по причине ограниченного доступа вод Мирового океана в акваторию СЛО. Вблизи Южного полюса, несмотря на потепление, продолжается рост материковых льдов. Дополнительное тепло, приносимое океаническими течениями, играет ключевую роль в росте или деградации как плавающих, так и наземных полярных ледников. В настоящее время мы являемся свидетелями заключительной стадии разрушения накопленной в прошлом плавающей части ледника в Северном полушарии и деградации сухопутных ледников, воды которых поднимают уровень океана и способствуют усилению зональных процессов теплообмена. Аналогичные механизмы действуют и в Антарктиде, но медленнее. Шельфовые ледники Антарктиды разрушаются с образованием большого количества айсбергов и битого льда, охлаждающего прилегающие воды и воздушные массы.

## Заключение

Приведенные в краткой форме результаты исследования, нацеленного на поиск основных причин современного потепления, показывают, что оно напрямую связано с таянием околополярных льдов. При уменьшении их объемов не вовлеченная в этот процесс энергия остается в системе «атмосфера — океан», повышая ее температуру. Другие факторы, к которым, например, относится рост концентрации парниковых газов в атмосфере, способствуют повышению приповерхностной температуры и ускоряют процессы таяния плавающих и сухопутных ледников, но из-за медленного развития подобных процессов катастрофических событий ожидать преждевременно.

При многолетних тенденциях изменений региональных климатических характеристик СЛО их влияние распространяется не только на все Северное, но и на Южное полушарие. Адекватная оценка этого влияния является одной из важных задач в понимании глобальных климатических изменений на планете. Она позволит строить реалистичные прогнозы нелинейных изменений характеристик атмосферы, океана и других геофизических параметров планеты на ближайшую и отдаленную перспективы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278, а также соглашение 13.УНУ.21.0007, госзадание FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024).

1. *Заявление* ВМО о состоянии глобального климата в 2019 году. Женева: ВМО, 2020. № 1248. 42 с.
2. *Архив* NCER/NCAR. Monthly Mean Timeseries: NOAA Physical Sciences Laboratory. URL: <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1> (last access: 8.10.2021).
3. *Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Язев С.А.* Климатические особенности распределения тепла в приземном слое атмосферы в полярных областях Земли // *Жизнь*

и Вселенная / под ред. В.Н. Обридко и М.В. Рагульской. М.: Астрономическое Общество, 2017. С. 180–186.

4. *Атлас океанов*. Северный ледовитый океан. 1980. 226 с.
5. URL: <http://psc.apl.uw.edu/research/projects/arctic-sea-ice-volume-anomaly/> (last access: 8.10.2021).
6. *Rothrock D.A., Zhang J.* Arctic Ocean sea ice volume: What explains its recent depletion? // *J. Geophys. Res.* 2005. N 110 (C1). P. C01002. DOI: 10.1029/2004JC0022823.
7. *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)*. IPCC, 2019. P. 75–129.
8. *Rothrock D.A., Percival D.B., Wensnaham M.* The decline in Arctic sea-ice thickness: Separating the spatial, annual, and interannual variability in a quarter century of submarine data // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N C05003. P. 1–9. DOI: 10.1029/2007JC004252.
9. *Смоляницкий В.М., Тюряков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е.* Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66, № 3. С. 337–348. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.
10. *Kovadlo P.G., Yazev S.A.* Polar glaciers and climate: About causes of climate changes // *Proc. SPIE*. 2014. V. 9292. DOI: 10.1117/122074656.

*P.G. Kovadlo, A.Yu. Shikhovtsev, S.A. Yazev. The role of glaciers in the processes of climate warming.*

We analyze the process of an increased, in comparison with other regions, rate of warming in the Arctic Ocean and adjacent areas. The visible aspect of the cause of the phenomenon is a decrease in the average thickness of ocean ice and, as a consequence, an increase in the flow of heat from the water through the ice, which heats the lower air layer. In addition, in the process of losing the ice mass of perennial floating glaciers, the heat consumption for their melting decreases. The combined effect of these two factors has provided the current rise in temperature in the polar zone, in a linear approximation, by more than 8°C. Note that inter-latitude air heat exchange does not intensify in this process due to a decrease in meridional temperature gradients.