

Физическая география и геоэкология

УДК 551.583 (98)

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-1-2020-7-16>

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В АРКТИКЕ: ЛОКАЛЬНОЕ И ГЛОБАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Н.Е. Сердитова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь

В работе сделан обзор последних научных исследований в области изменения климата в полярных районах и связанных с этими изменениями рисками. Отмечен ускоренный характер потепления в арктическом регионе и высокая чувствительность окружающей среды и инженерной инфраструктуры к происходящим изменениям. Рассмотрены возможные пути адаптации к этим изменениям, смягчение их последствий и информационно-образовательные аспекты.

Ключевые слова: Арктика, изменение климата, ускоренное потепление, адаптация, смягчение последствий, повышение информированности.

Введение

В северных широтах глобальное потепление идет темпами, более чем в два раза превышающими среднемировые. Это потепление уже сейчас оказывает заметное влияние на региональные ландшафты, инфраструктуру и экосистемы. Ожидается, что это ускоренное потепление сохранится и в дальнейшем. Целевой ориентир Парижского соглашения ограничить глобальное потепление до +1,5°C, в случае Арктики будет означать ограничение до +3°C. Сценарий «business-as-usual» («все как обычно»), не предполагающий никаких мер по снижению техногенных выбросов парниковых газов, прогнозирует повышение арктических температур в диапазоне от +8°C до +12°C [2, 4]. Полные последствия такого масштабного потепления трудно предсказать, однако, некоторые изменения видны уже сейчас. В этом смысле арктический регион, в силу ускоренного потепления, является чем-то вроде машины времени, демонстрирующий всему миру, какие серьезные изменения глобальное потепление принесет в будущем, если не предпринимать никаких мер. Эти изменения должны быть приняты во внимание самым внимательным образом и учитываться при разработке региональных планов территориального и стратегического развития, корректировке строительных норм и правил, техники безопасности, а, главное, донесены до сведения самого широкого круга специалистов.

Изменение арктического климата оказывает влияние далеко за пределами полярных районов. Арктика является своеобразным «холодильником» в глобальной климатической системе, огромным хранилищем льда, который, растаяв, поднял бы уровень мирового океана на 7 метров. Арктическое потепление меняет погоду в средних широтах, повышая вероятность наступления экстремальных погодных явлений.

Ускоренное потепление в Арктике и сопровождающие его такие наблюдаемые явления, как сокращение площади ледяного покрова, обвал ледяного шельфа и эрозия северных прибрежных зон, наглядно демонстрируют, что окружающая среда может быстро меняться под воздействием, казалось бы, незначительных факторов. В настоящей работе сделана попытка обзора последних научных исследований в области изменения климата в полярных районах и связанных с этими изменениями рисками, а также возможных путей адаптации к этим изменениям, смягчение их последствий и информационно-образовательных аспектов.

Почему потепление в северных районах происходит быстрее

Более интенсивное потепление Арктики по отношению к остальному миру подчеркивается практически в каждом из докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК или IPCC). Например, сравнение десятилетия 2006-2015 гг. с доиндустриальным эталонным периодом (1850-1900 гг.) показывает, что за этот промежуток времени глобальные средние температуры выросли на 0,87°C, в то время как зарегистрированный подъем температуры в Арктике был в два-три раза выше [1, 15]. Климатические модели МГЭИК прогнозируют, что эта тенденция сохранится и в будущем. Глобальные техногенные выбросы углекислого газа выросли на 1,7% в 2017 г. и примерно на 2,7% в 2018 г. [16, 17], указывая на то, что Арктика продолжает находиться на траектории быстрого потепления до +10°C или выше к концу этого столетия.

С точки зрения физики, «арктическое ускорение» является результатом наложения нескольких эффектов положительных обратных связей в снежной и ледяной среде [14, с.230]. Снижение высокой отражательной способности (альбедо) снежного или ледяного покрова на суше или на море означает, что все меньшая часть солнечной энергии отражается и рассеивается обратно в атмосферу, а все большая часть поглощается и идет на нагревание и таяние, что приводит к еще большему снижению альбедо, тем самым замыкая порочный круг. Более теплый воздух также содержит большее количество водяного пара, который сам по себе является парниковым газом, что еще больше усиливает эффект потепления. Результаты расчетов с использованием последних климатических моделей показывают, что одним из наиболее важных механизмов обратной связи является перенос тепла от все более

освобождающегося ото льда Северного Ледовитого океана в атмосферу [9, с.121].

Чувствительность Арктики к потеплению

В дополнение к ускоренному потеплению, Арктика проявляет чрезвычайную чувствительность к изменению температуры. Это происходит потому, что важными элементами окружающей среды на Севере являются снег и лед. Небольшие повышения температуры в районе точки плавления могут вызвать значительные изменения. В более низких широтах сдвиг температуры грунта, скажем, с 20 до 22°C, будет иметь малозаметный эффект в краткосрочной перспективе, но сдвиг температуры на те же два градуса от -1°C до +1°C вызовет таяние льда и полностью преобразует пейзаж на суше и на море. Этот эффект наблюдается каждым летом, когда полярный регион трансформируется в состояние, разительно отличающееся от зимнего. В настоящее время эта сезонная оттепель сдерживается огромными запасами льда, содержащимися в вечной мерзлоте, многолетнем морском льду, ледниках и Гренландии. Эти глубоко замороженные хранилища-холодильники являются наследием прошлого холодного климата, и они ослабляют последствия сезонного потепления, но постепенно более теплое лето истощает это наследие и их буферная роль ослабевает.

Последствия антропогенного изменения климата в настоящее время очевидны в Арктике и северных регионах. Объем и площадь покрытия морского льда постоянно сокращаются в течение последних десятилетий. Так, по сравнению с 1980 – ми годами площадь многолетнего ледяного покрова сейчас сократилась на 60% [6, 22].

Экологические последствия сокращения морского ледяного покрова

Сокращение площади морского льда оказывает прямое воздействие на многие морские и прибрежные виды, находящиеся в зависимости ото льда пищевых цепочках [6, 18], ставя некоторые из них на грань выживания. Уменьшение площади морского льда также имеет широкие косвенные последствия, в том числе путем воздействия на температуру и количество осадков на суше [18, 20]. Условия открытой воды повышают вероятность выпадения осадков в жидкой фазе, которые могут приводить к образованию ледяной корки на снегу, препятствующей питанию животных. Например, появление открытой воды вокруг полуострова Ямал в Северо-Западной Сибири и произошедшего в результате события "дождь на снегу" привело к гибели большого количества оленей, что оказало долгосрочное воздействие на скотоводство в регионе [1, 11].

Коренные народы тысячелетиями жили в вечно холодных районах Севера. Многие из их культурных практик требуют свободного передвижения по льду рек, озер, а также морю для охоты и рыбной ловли.

Смещение ледяного покрова, в том числе, влияет на их продовольственную безопасность.

Уязвимость северной инфраструктуры

Большая часть инженерной инфраструктуры севера была построена в двадцатом веке, когда вечная мерзлота считалась соизмеримой по прочности с бетонным фундаментом для зданий и сооружений, дорог, мостов, трубопроводов, вышек связи и других объектов. Вечная мерзлота прогрелась в Арктике примерно на $+0.39^{\circ}\text{C}$ за десятилетие 2007-2016 [6, 7, 9]. Как следствие, построенная на вечной мерзлоте инфраструктура все чаще подвергается риску [13, 22, 24]. Арктические прибрежные районы особенно уязвимы из-за эрозии береговой линии, возникающей в результате таяния вечной мерзлоты и дополнительной волновой нагрузки из-за появления больших пространств открытой воды, ранее покрытых льдом [12, с.7]. Общее количество осадков в среднем растет, при этом увеличивается доля жидких осадков [4, 6]. Это может ускорить эрозию почв и создать дополнительную опасность для северной инфраструктуры из-за затопления и оседания вечной мерзлоты. Арктические почвы с высокой концентрацией льда в мелкодисперсных отложениях особенно подвержены оттаиванию и оседанию. Недавний анализ показал, что треть инфраструктуры по всему Приполярному северу находится в таких регионах высокого риска. Это включает в себя 1590 км нефтепроводов в Восточной Сибири, 1260 км газопроводов, берущих свое начало в Ямало-Ненецком автономном округе [2, 5].

Последствия изменения арктического климата за пределами региона

Влияние Арктики на погодные условия в других широтах в настоящее время является предметом интенсивных исследований и продолжающихся научных дискуссий [20, 22]. Отмечая увеличивающийся «арктический след» через повышение уровня моря, эрозию прибрежных зон, выброс парниковых газов из тающей вечной мерзлоты, и потепление системы океан-атмосфера [19, 20, 22] делается вывод о том, что уже сейчас под влиянием полярных изменений возникают экстремальные погодные явления в средних широтах. Ускоренное потепление полярного региона ослабляет температурные градиенты Север-Юг и тем самым меняет крупномасштабную циркуляцию атмосферы и колебания планетарных волн. В частности, замедляет полярное струйное течение, препятствующее проникновению полярного воздуха на юг. Ослабление блокирующей роли полярного струйного течения вызвало несколько аномально холодных зим в Евразии в Северной Америке [3, 19]. Аналогично, высвобождение летнего тепла из все более свободного ото льда Северного Ледовитого океана к северу от Аляски, возможно, способствовало засухе в

Калифорнии. Заметные изменения, происходящие в Арктике, дают ясное раннее предупреждение о том, что серьезные климатические последствия могут ожидать на всем земном шаре.

Адаптация к изменениям

Арктика меняется так быстро, что необходимо скорейшее решение задач, связанных с потеплением климата. Например, в анализе северной инфраструктуры на вечной мерзлоте в работе [1, 13] делается вывод о том, что даже если будут существенно сокращены выбросы парниковых газов, риски останутся высокими вплоть до 2050 г. Необходима разработка мер адаптации к ожидаемым изменениям для минимизации их неблагоприятных последствий [1, 5]. Необходимо также совершенствовать методы мониторинга, в том числе, с использованием средств спутникового дистанционного зондирования для предупреждения опасных речных и морских ледовых условий. Аналогично, существует необходимость в усилении политики надзора и профилактики для водных объектов экосистемы, в том числе, для контроля запасов питьевой воды.

Региональные парки, заповедники и другие природоохранные зоны играют ключевую роль в защите северных видов и экосистем от дополнительных стрессов, возникающих в связи с ускоренным потеплением. Арктические экосистемы имеют меньшее биоразнообразие растений и животных, чем в умеренной зоне, и потеря только одного или нескольких видов может полностью разрушить пищевые цепочки. С продолжающимся потеплением многие виды растений, животных и микробов будут выведены на верхний предел их тепловых условий существования, что повысит их чувствительность к другим стрессовым факторам.

В сфере экологической безопасности необходимо обеспечить сохранение биологического разнообразия арктической флоры и фауны, в том числе путем расширения сети особо охраняемых природных территорий и акваторий, с учетом национальных интересов Российской Федерации, в условиях расширения хозяйственной деятельности и глобального изменения климата.

Смягчения последствий

Политика смягчения последствий изменения климата, ограничивающая антропогенные выбросы, может существенно изменить ситуацию в сторону снижения степени воздействия на окружающую среду. Сохранение же выбросов на прежнем уровне (сценарий «как обычно») может привести к такому климату, который не наблюдался на планете с раннего эоцена, т.е. почти 50 миллионов лет. Тенденция охлаждения климата десятков миллионов лет назад была бы «отмотана» обратно менее чем за два столетия. Представляется маловероятным, что существующие экосистемы во всем мире смогут выдержать такую

беспрецедентную скорость изменений [8, 19]. Тот же сценарий «как обычно» прогнозирует потепление в верхних слоях океана в пределах 35-50% от того, что наблюдалось 250 миллионов лет назад. Это потепление, как полагают ученые, было ответственно за потерю 96% из всех морских видов на Земле из-за кислородного истощения, с наибольшими эффектами в высоких широтах [23, с.1327].

Известно, что Гренландский ледяной щит проявлял нестабильность в течение гораздо более короткого временного масштаба потепления. Есть данные, что уровень моря поднимался на шесть метров за 1000 лет в течении последнего межледникового периода около 100 000 лет назад, и что почти полная дегляциация Южной Гренландии произошла в межледниковье около 400 000 лет назад [8, 10]. Анализ МГЭИК (2018) показывает, что необратимая потеря Гренландского ледового щита может произойти при росте температуры на 1,5-2°C, что указывает на настоятельную необходимость сокращения выбросов парниковых газов. Аналогично показано, что вероятность освобождения ото льда Северного Ледовитого океана летом при глобальном потеплении на 1,5°C существенно ниже, чем при потеплении на 2°C. В докладе также отмечено, что целевой показатель повышения глобальной температуры на 1,5°C, а не на 2°C дает большую разницу в масштабах последствий для человека, принесенных глобальным потеплением, проявляющихся в том числе, в: повышении уровня моря, смертности, связанной с тепловыми волнами, интенсивностью лесных пожаров, сокращением продовольственных запасов и экосистемных услуг и ограничением адаптационных возможностей, а также тем, что Арктика особенно уязвима к дополнительным 0,5°C глобальной температуры. Анализ рисков для арктической инженерной инфраструктуры [13, с.5147] показывает ее особую уязвимость к дополнительным 0,5°C в следующие несколько десятилетий независимо от контроля за выбросами. Сокращение масштабов потепления до целевого показателя Парижского соглашения +1,5°C существенно уменьшит ущерб инфраструктуре.

Арктические вечномерзлые почвы содержат огромные запасы углерода, который в результате полного оттаивания и разложения может более чем удвоить уровень углекислого газа в атмосфере. Во многих районах Севера углерод преобразуется в более мощный парниковый газ метан в результате микробиологических процессов в озерах, прудах и водно-болотных угодьях вечной мерзлоты [18, 21]. Модельные сравнения выбросов парниковых газов показывают, что сценарий "как обычно" мог бы превратить северные мерзлые грунты из чистого стока в чистый источник углерода после 2100 г., что указывает на важность мер по смягчению последствий для ослабления влияния обратной связи вечной мерзлоты на климат [19, 21]. Появляются также новые факторы,

которые могут ускорить таяние вечной мерзлоты и производство метана, например, теплые осадки весной [6, 21].

Образовательные и информационные аспекты

Арктика стремительно меняется и безопасность ее жителей и экосистем требует, как локальных, так и глобальных мер. Эти меры могут быть разработаны и реализованы только в случае если рядовые граждане и руководители хорошо осведомлены и понимают природу проблем, связанных с изменением климата также, как и необходимость принятия мер. Для широкого информирования и передачи знаний необходимо их постоянное обновление. Это подразумевает проведение исследований не только для определения текущего положения дел в Арктике, но и проведение фундаментальных и прикладных исследований, направленных на снижение неопределенностей в прогнозах и поиск новых решений для эффективных мер адаптации и смягчения последствий. Необходим обмен знаниями на всех уровнях, от распространения соответствующей локальной информации до передачи результатов последних научных исследований об изменениях в Арктике и их глобальных последствиях для максимально широкого круга лиц, принимающих решения [2, 5, 24].

Арктика сейчас находится в центре беспрецедентного внимания исследовательских агентств и ученых. Есть неопровержимые научные доказательства того, что наш планетарный климат быстро меняется в результате человеческой деятельности. Доклады МГЭИК четко дают понять: необходимо принятие срочных мер по сокращению выбросов парниковых газов и снижению их концентрации. Это может снизить тяжесть экологических и социально-экономических последствий изменения климата. Увеличивающаяся частота лесных пожаров, штормов и волн жары, вместе с уменьшением биоразнообразия, снижением урожайности сельскохозяйственных культур, повышением уровня моря и затоплением прибрежных районов показывают, что реальность изменения климата начала проникать в нашу жизнь.

Существуют обнадеживающие тенденции в уровне осведомленности общественности о глобальном изменении климата, но еще многое предстоит сделать в области науки, образования и просвещения. Арктические исследования играют ключевую роль в этом процессе передачи знаний. Вспоминая девиз «думай глобально, действуй локально», хотелось бы предложить научно-образовательному сообществу приступить к реализации двух направлений деятельности: 1) открыть и сделать массовыми образовательные программы об изменении климата и его влиянии на социально-экономические процессы в регионе; 2) приступить к разработке региональной климатической программы с мерами адаптации и смягчения последствий изменения климата до 2050 г.

Список литературы

1. Катцов В.М., Б. Н. Порфирьев, В. А. Говоркова, Д. О. Елисеев, С. В. Ефимов, А. А. Киселев, В. П. Мелешко, Т. В. Павлова, А. А. Пикалева, Б. А. Ревич, П. В. Спорышев, Н. Е. Терентьев, Е. И. Хлебникова, И. М. Школьник, Изменения климата Арктики: место климатической науки в планировании адаптации. (П/ред. В.М. Катцова). Климатический центр Росгидромета. 2017. 104 с.
2. Кириллина К.С., Лобанов В.А., Сердитова Н.Е. Оценка будущего климата республики Саха (Якутия) \ \ Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 40. С. 113-126.
3. Мелешко В.П., Катцов В.М., Мирвис В.М., Байдин А.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А. Существует ли связь между сокращением морского ледяного покрова в Арктике и ростом повторяемости аномально холодных зим в Евразии? Синтез современных исследований. Метеорология и гидрология. 2018. №11. С. 49-67.
4. Спорышев П.В., Катцов В.М., Гулев С.К. Изменения приземной температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу. Доклады Академии Наук (Геофизика), 479. 2018. № 5. С. 569–573.
5. Хлебникова Е.И., Катцов В.М., Пикалева А.А., Школьник И.М. Оценка изменения климатических воздействий на экономическое развитие территории российской Арктики в XXI веке. Метеорология и гидрология. 2018. № 6 .С. 5-19.
6. Bintanja, R., and O. Andry. 2017. Towards a Rain-Dominated Arctic. *Nature Climate Change* 7: 263–267.
7. Biskaborn, B.K., S.L. Smith, J. Noetzli, H. Matthes, G. Vieira, D.A. Streletskiy, P. Schoeneich, et al. 2019. Permafrost is Warming at a Global Scale. *Nature Communications* 10 (1): 264.
8. Burke, K.D., J.W. Williams, M.A. Chandler, A.M. Haywood, D.J. Lunt, and B.L. Otto-Bliesner. 2018. Pliocene and Eocene Provide Best Analogs for Near-Future Climates. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (52): 13288–13293.
9. Dai, A., D. Luo, M. Song, and J. Liu. 2019. Arctic Amplification is Caused by Sea-Ice Loss under Increasing CO₂. *Nature Communications* 10 (1): 121.
10. Fischer, H., K.J. Meissner, A.C. Mix, N.J. Abram, J. Austermann, V. Brovkin, E. Capron, et al. 2018. Palaeoclimate Constraints on the Impact of 2 °C Anthropogenic Warming and Beyond. *Nature Geoscience* 11: 474–485.
11. Forbes, B.C., T. Kumpula, N. Meschtyb, R. Laptander, M. Macias-Fauria, P. Zetterberg, M. Verdonen, et al. 2016. Sea Ice, Rain-on-snow and

- Tundra Reindeer Nomadism in Arctic Russia. *Biology Letters* 12 (11): 20160466.
12. Fritz, M., J.E. Vonk, and H. Lantuit. 2017. Collapsing Arctic Coastlines. *Nature Climate Change* 7: 6–7.
 13. Hjort, J., O. Karjalainen, J. Aalto, S. Westermann, V.E. Romanovsky, F.E. Nelson, B. Etzelmüller, and M. Luoto. 2018. Degrading Permafrost Puts Arctic Infrastructure at Risk by Mid-Century. *Nature Communications* 9 (1): 5147.
 14. Holland, M.M., and C.M. Bitz. 2003. Polar Amplification of Climate Change in Coupled Models. *Climate Dynamics* 21 (3–4): 221–232.
 15. IPCC. 2018. Special Report on Global Warming of 1.5°C (SR15). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
 16. Le Quéré, C., R.M. Andrew, P. Friedlingstein, S. Sitch, J. Hauck, J. Pongratz, P.A. Pickers, et al. 2018. Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data* 10:2141–2194.
 17. Le Quéré, C., J.I. Korsbakken, C. Wilson, J. Tosun, R. Andrew, R.J. Andres, J.G. Canadell, et al. 2019. Drivers of Declining CO₂ Emissions in 18 Developed Economies. *Nature Climate Change* 9: 213–217.
 18. Macias-Fauria, M., and E. Post. 2018. Effects of Sea Ice on Arctic Biota: An Emerging Crisis Discipline. *Biology Letters* 14 (3): 20170702.
 19. McGuire, A.D., D.M. Lawrence, C. Koven, J.S. Clein, E. Burke, G. Chen, E. Jafarov, et al. 2018. Dependence of the Evolution of Carbon Dynamics in the Northern Permafrost Region on the Trajectory of Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (15): 3882–3887.
 20. Moon, T.A., I. Overeem, M. Druckenmiller, M. Holland, H. Huntington, G. Kling, and A.L. Lovecraft. 2019. The Expanding Footprint of Rapid Arctic Change. *Earth's Future*. <https://doi.org/10.1029/2018EF001088>.
 21. Neumann, R.B., C.J. Moorberg, J.D. Lundquist, J.C. Turner, M.P. Waldrop, J.W. McFarland, E.S. Euskirchen, C.W. Edgar, and M.R. Turetsky. 2019. Warming Effects of Spring Rainfall Increase Methane Emissions from Thawing Permafrost. *Geophysical Research Letters* 46 (3): 1393–1401.
 22. Overland, J., E. Dunlea, J.E. Box, R. Corell, M. Forsius, V. Kattsov, M.S. Olsen, et al. 2018. The Urgency of Arctic Change. *Polar Science*. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.11.008>. (дата обращения: 20.02.2020).
 23. Penn, J.L., C. Deutsch, J.L. Payne, and E.A. Sperling. 2018. Temperature-Dependent Hypoxia Explains Biogeography and Severity of End-Permian Marine Mass Extinction. *Science* 362 (6419): eaat1327.
 24. Tsurkan, M., Serditova, N., Vorotnikov, A. The sustainability of ecologically-friendly construction projects in the Arctic territory of the Russian Federation //(2019) IOP Conference Series: Earth and

- Environmental Science, 317 (1), [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85071933504&doi=10.1088%2f1755-1315%2f317%2f1%2f012014&partnerID=40&md5=5897f37097e38f253dc1e2f4e0879fef>. (дата обращения: 25.02.2020) DOI: 10.1088/1755-1315/317/1/012014
25. Vincent, W.F., T.V. Callaghan, D. Dahl-Jensen, M. Johansson, K.M. Kovacs, C. Michel, T. Prowse, J.D. Reist, and M. Sharp. 2011. Ecological Implications of Changes in the Arctic Cryosphere. *Ambio* 40 (1): 87–99.
26. Vincent, W.F., M. Lemay, and M. Allard. 2017. Arctic Permafrost Landscapes in Transition: Towards an Integrated Earth System Approach. *Arctic Science* 3 (2): 39–64.

CLIMATE CHANGE IN ARCTICA: LOCAL AND GLOBAL IMPACT ON THE ENVIRONMENT

N.E. Serditova

Tver State University, Tver

Results of recent research on climate change in polar regions and the risks associated are reviewed. The accelerated nature of warming in the Arctic region and the high sensitivity of the environment and engineering infrastructure to the changes are noted. Possible ways of adaptation to these changes, mitigation of their consequences, and informational and educational aspects are considered.

Keywords: *Arctica, climate change, amplified warming, adaptation, mitigation, awareness raising.*

Об авторе:

СЕРДИТОВА Наталья Евгеньевна - доктор географических наук, профессор, проректор по учебно-воспитательной работе, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», Тверская область, г. Тверь, ул. Желябова, д.33, 170100, Serditova.ne@tversu.ru.