



ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АРКТИЧЕСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ИЗ-ЗА ТАЯНИЯ ЛЬДОВ И МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

ГУДМЕСТЭД О.Т.

Почетный профессор факультета
естественных и технических наук
Университета Ставангера, г. Ставангер,
Норвегия
ove.t.gudmestad@uis.no;
otgudmestad@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный и адаптированный перевод доклада норвежского профессора Уве Тобиаса Гудместэда «Технические и экономические проблемы арктических прибрежных населенных пунктов из-за таяния льдов и многолетней мерзлоты» (Gudmestad, 2020). Этот доклад был сделан в Токио на 6-й Международной конференции по водным ресурсам и окружающей среде. Он также был опубликован в виде статьи в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей поистине международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Gudmestad, 2020) приведена в конце.

Из-за таяния ледяного покрова и многолетней мерзлоты в Арктике вызывает беспокойство безопасность расположенных там прибрежных населенных пунктов. Эта озабоченность обусловлена такими причинами как: увеличение площадей не покрытых льдом акваторий в сезоны штормов, приводящее к более сильным штормовым нагонам и более крупным волнам; усиление таяния многолетней мерзлоты из-за более теплых летних сезонов; более сильная эрозия оттаявшей береговой линии; увеличение числа штормов, вызывающее накопление последствий штормовой эрозии; крупные наводнения, разрушающие дома, сооружения, инфраструктуру и водоемы с пресной водой. Из-за таяния многолетней мерзлоты на дне моря возможно возникновение оползней, которые могут вызвать цунами. Из-за ее оттаивания будут разрушаться берега рек. Возникнут оползни, вызванные повышенной влажностью (например, оползни из глинистых грунтов), что приведет к повреждению или разрушению жилищ и водоемов с пресной водой. Кроме того, из-за потепления климата становятся короче зимние сезоны и, соответственно,

укорачиваются сезоны использования зимних дорог (зимников) и охоты со льда. Таким образом, потепление климата приведет к экономическим потерям для прибрежных арктических населенных пунктов, а в случае необходимости переселения их жителей издержки будут просто огромными. В данной статье обсуждаются последствия таяния льдов и многолетней мерзлоты для таких поселений и предлагаются определенные меры по их некоторому смягчению. Окончательным решением все равно будет переселение жителей, а в некоторых случаях – перенос населенных пунктов в более безопасные места подальше от берега.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Арктика; прибрежные населенные пункты; изменения климата; таяние льдов; сокращение ледяного покрова; высота волны; длина разгона волны; штормовой нагон; береговая эрозия; таяние многолетней мерзлоты; оползни; оседание; экономические проблемы; технические проблемы; стратегии управления.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Гудместэд О.Т. Технические и экономические проблемы арктических прибрежных населенных пунктов из-за таяния льдов и многолетней мерзлоты (пер. с англ.) // Геоинфо. 2023. Т. 5. № 8. С. 14–21 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-8-14-21

TECHNICAL AND ECONOMIC CHALLENGES FOR ARCTIC COASTAL SETTLEMENTS DUE TO MELTING OF ICE AND PERMAFROST IN THE ARCTIC

GUDMESTAD O.T.

Professor Emeritus, Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, Stavanger, Norway
 ove.t.gudmestad@uis.no;
 otgudmestad@gmail.com

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the report “Technical and economic challenges for Arctic coastal settlements due to melting of ice and permafrost in the Arctic” by Ove Tobias Gudmestad, a Norwegian professor (Gudmestad, 2020). This report was presented at the 6th International Conference on Water Resource and Environment in Tokyo. It was also published as an article in the Earth and Environmental Science journal by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Gudmestad, 2020) for the presented translation is given in the end.

The safety of Arctic coastal settlements is of concern due to melting of the ice cover and the permafrost in the Arctic. The immediate concerns for Arctic coastal settlements are due to a number of causes. These causes can be listed as follows: increased distances of open seas during the storm season, larger storm surges due to longer distances of open water without ice cover, larger waves due to longer fetch lengths, increased permafrost melting caused by warmer summer seasons, larger erosion of melted shoreline, increased number of storms causing accumulation of storm erosion effects, large flooding events destroying houses and facilities as well as infrastructure and fresh water reservoirs. There will be possible offshore slides due to melting of offshore permafrost with potential for tsunami generation, and riverbanks will erode due to the melting of permafrost. Slides caused by increased wetness (for example quick clay slides) will occur and housing and water reservoirs will be damaged. Furthermore, the winter seasons are shorter where winter roads can be utilized and the seasons for hunting from the ice cover is shorter. There will be economic losses for the settlements due to changing climate and in the case of needed relocation of the settlements, the economic costs are huge. The paper discusses the effects of these concerns and will suggest certain mitigating measures, which only to a limited extent can relieve the situation. The ultimate solution will be relocation of the inhabitants and in some cases the settlement may be relocated to safe location further inland.



KEYWORDS:

Arctic; coastal settlements; climate change; melting ice; ice cover reduction; wave height; wave fetch length; storm surge; coastal erosion; melting permafrost; landslides; subsidence; economic problems; technical problems; management strategies.

FOR CITATION:

Gudmestad O.T. *Tekhnicheskiye i ekonomicheskiye problemy arkticheskikh pribrezhnykh naseleennykh punktov iz-za tayaniya l'dov i mnogoletney merzloty* [Technical and economic challenges for Arctic coastal settlements due to melting of ice and permafrost in the Arctic] (translated from English into Russian) // *GeoInfo*. 2023. T. 5. № 8. S. 14–21 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-8-14–21 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ▶

Растет обеспокоенность тем, что сокращение ледяного покрова арктических морей (рис. 1) окажет весьма негативное влияние на прибрежные населенные пункты Арктики из-за таких последствий, как наводнения и эрозия. Кроме того, таяние многолетней мерзлоты усложняет продолжение традиционной деятельности людей в этих поселениях.

В данной статье будут обобщены метеорологические и океанографические аспекты этих проблем. Некоторые арктические населенные пункты, такие как Туктояктук (на северо-западном побережье Канады [2]), Варандей (на берегу Баренцева моря в России [3–6]), Кивалина (на побережье Аляски к северу от Берингова пролива [7, 8]) и Ньюток (на реке Нингалук на Аляске), испытывают большие проблемы из-за приближения к ним береговой линии, и там ведутся работы по их защите, а при необходимости и переносу на безопасные территории.

ФАКТОРЫ, СПОСОБСТВУЮЩИЕ БЕРЕГОВОЙ ЭРОЗИИ В АРКТИКЕ ▶

Сокращение ледяного покрова и увеличение длины разгона волн ▶

Одним из последствий сокращения ледяного покрова в Арктике в конце лета и начале осени (когда начинаются штормы) является увеличение длины разгона волн. Ниже будут представлены формулы для определения высоты и периода волны в зависимости от длины ее разгона в соответствии с «Руководством армии США по прибрежным защитным сооружениям» [9]. Эти формулы можно использовать для расчета увеличенной высоты волн в штормовые периоды года, когда в Арктических морях мала площадь ледяного покрова.

1. Сначала необходимо рассчитать скорость ветра в слое трения:

$$u_* = W \sqrt{0,001(1,1 + 0,035W)}, \quad (1)$$

где u_* – скорость ветра в слое трения, м/с;

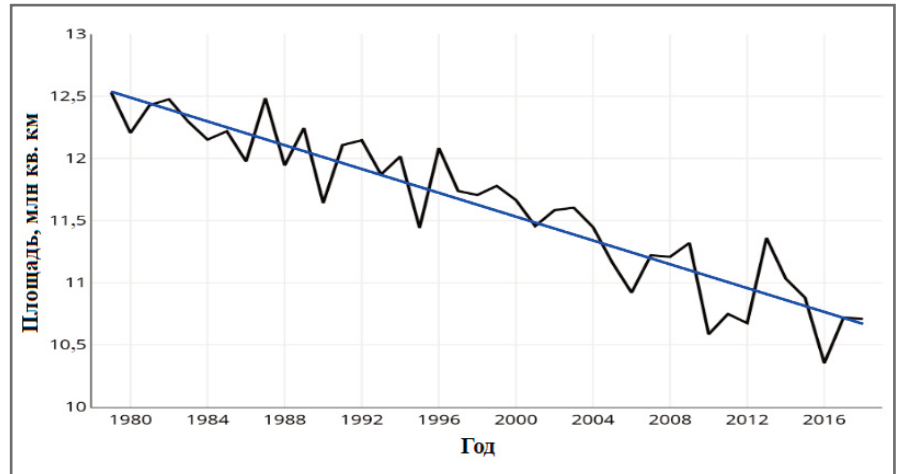


Рис. 1. Изменения среднеиюньской площади льда, покрывающего арктические моря, с 1979 по 2018 год. В этот период наблюдалось ее сокращение на 4,1% за десятилетие [1]

W – средняя скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью, м/с.

2. Затем надо рассчитать эквивалентную длину разгона волны, которая зависит от продолжительности ветра:

$$\frac{gF_{eq}}{u_*^2} = 0,00523 \left(\frac{gt_d}{u_*} \right)^{1,5}, \quad (2)$$

где F_{eq} – эквивалентная длина разгона волны, м; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; t_d – продолжительность ветра.

3. После этого нужно проверить, ограничиваются ли параметры волны длительностью порыва ветра в пределах длины разгона волны F вдоль фактического направления ветра.

Если $F_{eq} > F$, то набор волной высоты ограничивается величиной F и фактическим расстоянием вдоль поверхности воды, не покрытой льдом. В этом случае для расчета характерной значительной высоты волны H_s должно использоваться значение F и следующее уравнение:

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 0,0413 \left(\frac{gF}{u_*^2} \right)^{0,5}. \quad (3)$$

Если $F_{eq} < F$, то набор волной высоты ограничивается продолжительностью ветра. В этом случае для расчета характерной значительной высоты волны H_s

должно использоваться значение F_{eq} и следующее уравнение:

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 0,0413 \left(\frac{gF_{eq}}{u_*^2} \right)^{0,5}. \quad (4)$$

4. Расчет характерного периода волны T_s выполняется с помощью формулы:

$$\frac{gT_s}{u_*} = 0,71345 \left(\frac{gF}{u_*^2} \right)^{0,33}. \quad (5)$$

С применением такого анализа можно выявить влияние расстояния вдоль поверхности свободной ото льда воды на значительную высоту волны. Очевидно, что более крупные волны увеличат подверженность берега эрозии [10, 11].

Штормовые нагоны ▶

Во время шторма вода уносится в направлении ветра, что вызывает ее скопление у берега. Этот эффект очень сильно выражен в районах с пологим морским дном, таких как побережье Нидерландов и побережье Мексиканского залива в США. Затопление территории Нового Орлеана во время урагана «Катрина» произошло в основном из-за штормового нагона и перелива волн через защитные дамбы [12]. Аналогичные условия существуют и в некоторых частях Арктики, где к тому же

имеется инверсия глубины воды, то есть дно относительно мелководных морей имеет пологий уклон в сторону берега.

Высота штормового нагона зависит от обратного барометрического эффекта (понижения атмосферного давления в зоне действия), скорости ветра, толкающего воду к берегу, длины разгона волн и степени инверсии глубины воды. Поскольку уменьшение площади ледяного покрова приведет к усилению нагонного воздействия, важно понимать влияние длины разгона волн на высоту штормового нагона η . Согласно работе Коно [13] эти эффекты можно кратко описать следующим образом.

1. Вклад в общую высоту штормового нагона со стороны *обратного барометрического эффекта* (когда снижение атмосферного давления на 1 ГПа соответствует высоте нагона 1 см):

$$\eta_p = \frac{\Delta P}{\rho g}. \quad (6)$$

2. Вклад в общую высоту штормового нагона со стороны *ветра*:

$$\eta_w = \frac{3}{2} \frac{\tau_s L}{\rho g h}, \quad (7)$$

где $\tau_s = \rho_{\text{возд.}} C_d V^2$ – давление ветра, являющееся функцией квадрата скорости ветра; L – длина разгона волны по горизонтали; $1/h$ – величина, обратная глубине воды.

Дополнительную информацию по факторам и параметрам штормовых нагонов можно посмотреть в работе Коно и др. [14] и в руководстве [15].

Совокупное воздействие высоты прилива, высоты штормового нагона и высоты волн определяет уровень воды, воздействующей на береговую линию. Следует отметить, что при изучении долгосрочных последствий следует учитывать любое общее повышение уровня моря (последствия повышения уровня моря изучались в течение многих лет – например, в работе Берда [16] приводится краткое изложение этих вопросов). Кроме того, любое понижение уровня берега из-за таяния и разрушения многолетнемерзлых грунтов также приведет к наступлению моря на сушу.

Описанная выше опасная ситуация подтверждается сравнительно недавними событиями. Например, 24 июля 2010 года произошло значительное затопление территории вахтового поселка Варандей на побережье Баренцева моря на севере России (что вызвало серьезные разрушения и повреждения инфраструктуры – автомобильной дороги, газопровода, ЛЭП, метеостанции, хозяйственных по-

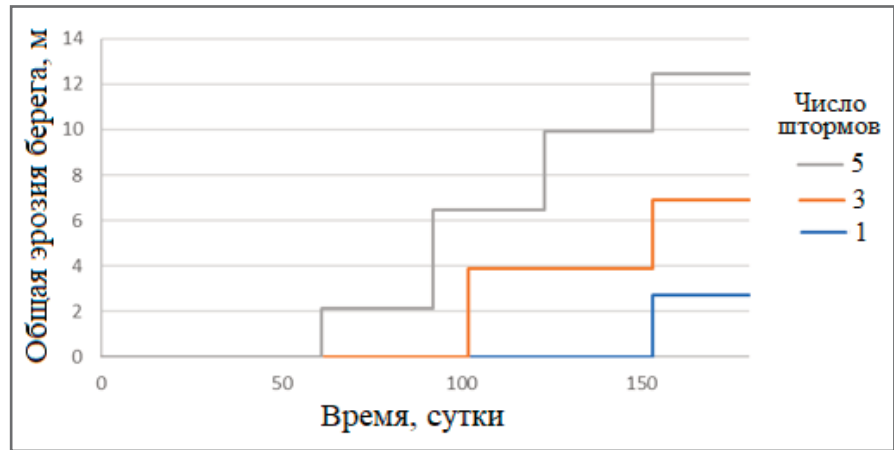


Рис. 2. Общая эрозия берега как функция времени [17]



Рис. 3. Общая эрозия берега к концу осеннего сезона как функция количества штормов (штормовых нагонов) за период оттаивания береговых грунтов [17]

строек; также ряд судов был вынесен на сушу на десятки метров от берега; отступление берега из-за эрозии местами достигло 19 м. – *Ред.*) [11]. Это событие было вызвано сочетанием штормовых волн, нагонов и приливов. Внесла свой вклад и эрозия береговой линии из-за таяния многолетней мерзлоты вдоль нее.

Таяние многолетней мерзлоты и эрозия береговой линии ►

Из-за повышения средней температуры воздуха в Арктике тает многолетняя мерзлота. Это подвергает слабые береговые отложения, песчаные пляжи и валы усиленной эрозии. Эрозия зависит от воздействий моря, и при каждом наводнении, вызванном высоким уровнем воды, море «откусывает» часть берега. В случае увеличения количества штормов эрозия вырастет. Модель такой повышенной эрозии предложена в работе Ицака [17].

В настоящем исследовании для оценки количества эродированного грунта в течение одного года приняты следующие допущения:

- эрозия происходит только с мая по сентябрь, поскольку она незначительна при мерзлом грунте (с октября по апрель);
- в конце каждого сезона (весеннего, летнего, осеннего) на берег обрушивается штормовой нагон, эродирующий все оттаявшие грунты;

- длительность того или иного сезона составляет 50 дней.

В период 2005–2007 гг. средняя скорость эрозии на территории Варандей составляла 2,7 м/год [6]. Используя эту фактическую цифру и приведенные выше допущения, можно оценить объем эродированных грунтов. Поскольку принимается, что весь оттаявший материал удаляется штормовым нагоном в конце каждого сезона, оставшийся мерзлый грунт затем подвергается более сильному воздействию тепла и его верхний слой снова оттаивает из-за удаления изолирующего слоя. Наличие изолирующего слоя замедляет таяние – следовательно, единственный штормовой нагон в конце осеннего сезона влияет на скорость эрозии гораздо меньше, чем повторяющиеся штормы.

Чтобы оценить влияние количества штормов за год на общую скорость эрозии, в работе Берда [16] была проанализирована чувствительность эрозии как функция числа штормов. Период с мая по сентябрь был разделен на подпериоды. Как уже отмечалось, было принято допущение о том, что штормовой нагон приходит на берег в конце каждого подпериода, разрушая весь оттаявший материал. На рисунке 2 показана общая эрозия берега как функция времени для разных количеств штормов. Эти результаты суммированы на



Рис. 4. Крупные медленно движущиеся оползни из оттаивающих грунтов приближаются к Трансальяскинской автомагистрали и Трансальяскинскому нефтепроводу (фото Эли Кинтиша (Eli Kintisch), Аляска, 2015 г.) [20]



Рис. 5. Оползень из плавунных глин после периода увлажнения (фото Андерса Бьордала (Anders Bjordal)) [23]

рисунке 3, где показана общая эрозия берега к концу осеннего сезона как функция числа штормов (штормовых нагонов) за период оттаивания береговых грунтов.

Эти предполагаемые скорости эрозии примерно соответствуют результатам измерений Рэйвенса и Петерсона [18], выполненных на мысе Дрю-Пойнт на Аляске, где средняя фактическая эрозия в период 2008–2011 гг. составила 15 м/год.

Ахмадом и др. [19] недавно было проведено исследование береговой эрозии в Арктике, вызванной волнами, разбивающимися о склон и о вертикальный обрыв. Это исследование показало, что глубина размыва у подножия обрыва величиной 1 м должна происходить примерно за 300 с. Эти цифры приблизительно совпадают с фактическими величинами, наблюдавшимися на побережье Бьорндален – Исфьорден на Шпицбергене в сентябре 2015 года. Нет никаких сомнений в том, что размывание может очень быстро ускориться во время ударов больших волн.

На суше таяние многолетней мерзлоты приводит к возникновению оползней. И даже на дне моря имеются участки многолетней мерзлоты, которые еще не растаяли.

Когда тает многолетняя мерзлота, оползни на суше происходят чаще. Так, Трансальяскинской автомагистрали и Трансальяскинскому нефтепроводу угрожают разрушения склонов [20] (рис. 4). Возможно, потребуются перенос этих сооружений или их участков. Дополнительную информацию по этим вопросам можно посмотреть в работе Гиртсема и Клагу [21].

Районы, сложенные высокопластичными глинами, также сильно подвержены возникновению огромных оползней, когда погода становится более теплой и влажной. Например, такой оползень, случившийся в июне 2020 года в городе Алта на севере Норвегии, разрушил 8 домов (погибших не было), а также сильно повредил дорогу [22] (рис. 5).

Таяние прибрежной многолетней мерзлоты может вызвать особенно опасный сход оползней в море. Так, утром

17 июня 2017 года арктическое цунами обрушилось на поселок Нугаатсиак в Гренландии [24] (огромный оползень из скальных пород сошел с крутого склона залива Карратфьорд, разрушил находившийся ниже ледник, и все это обрушилось в воду, вызвав ее подъем более чем на 90 м в этом месте и на 10 м в 30 км от фьорда; поселок находился в 20 км, там было разрушено 11 домов, без вести пропали 5 человек, пострадали 9 человек. – *Ред.*). Из-за угрозы последующих морских оползней и цунами все 84 жителя этого поселка были переселены в другое место. В настоящее время лишь несколько человек осмелились вернуться и жить там. Следует отметить, что фьорды Западной Гренландии являются очень глубокими и новые подобные оползни там не будут неожиданностью.

По мере повышения температуры воды в летний период будет также происходить таяние подводной многолетней мерзлоты. При этом следует иметь в виду, что морская вода с содержанием соли 2,5‰ замерзает при температуре минус 1,8 °С. Однако пресная вода в многолетней мерзлоте тает при температуре 0 °С.

В случае наклонного морского дна существует определенная вероятность возникновения на нем оползней, способных вызвать цунами, которые могут сильно ударить по прибрежным населенным пунктам на низинных территориях.

Последствия таяния многолетней мерзлоты для существующих зданий и сооружений ►

В теплые летние месяцы верхний слой многолетней мерзлоты оттаивает. Если он растает сильнее, чем прогнозировалось при строительстве уже имеющихся зданий или сооружений, которые на него опирались, то они подвергнутся оседанию, будут серьезно повреждены и станут непригодными для проживания или других типов эксплуатации. Особые опасения вызывают дороги и взлетно-посадочные полосы аэродромов, которые потребуют ежегодного масштабного ремонта. Даже главный аэропорт Гренландии в поселке Кангерлуссуак может стать непригодным для эксплуатации с 2024 года. Уже сейчас на его дорожном покрытии начали появляться трещины [25].

Таким образом, арктическая инфраструктура находится под угрозой [26].

Населенные пункты, расположенные вблизи побережья, в случае таяния

многoletней мерзлоты сталкиваются с проблемой инфильтрации соленой воды, особенно во время наводнений, в водоемы с пресной водой. Эта ситуация может стать критической для их жителей. Возможно, даже потребуются вкладывать средства в оборудование для опреснения воды, чтобы обеспечить наличие ее резервных запасов.

Процесс таяния многолетней мерзлоты также приведет к нарушению снабжения пресной водой. Поэтому, например, в Университете Оулу (Финляндия) совместно с Университетом Аляски в Анкоридже (США) ведутся проекты по изучению доступности пресной воды для сообществ арктических жителей [27].

СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С БЕРЕГОВОЙ ЭРОЗИЕЙ И ТАЯНИЕМ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ►

Во всем мире разрабатываются стратегии управления по борьбе с береговой эрозией для различных типов отложений [28]. Ограничение очень быстрой эрозии арктических береговых линий, вызванной таянием многолетней мерзлоты и ухудшением его последствий штормами, требуют дорогостоящих мер защиты, например использования мешков с песком, камней или бетона. Однако последствия таяния мерзлоты являются неопределенными, и уже рассматриваются и даже реализуются меры по переносу населенных пунктов или переселению людей в более благоприятные места. Так, давно идут попытки по переносу поселка Ньюток (Аляска) с берега реки на более возвышенную территорию. Возможно, в скором времени также потребуются переместить, например, поселок Кивалина (Аляска, рис. 6) [29]. Более подробную информацию по этому поводу можно получить в работе Гамильтона и др. [30].

Особым явлением для города Уткиагвик (самого северного населенного пункта на Аляске, ранее называвшегося Барроу) является то, что водоемы с пресной водой для него вскоре могут быть затоплены из-за эрозии и наступления моря (рис. 7). Возможно, потребуется его перенос в другое место с последующей прокладкой трубопроводов для подачи пресной воды. Но затраты на это должны быть сопоставлены с вложением средств в опреснительные установки.

Арктические населенные пункты, подобные вышеупомянутым, сталкиваются с особыми проблемами из-за близкого расположения к морям или рекам.



Рис. 6. Кивалина – отдаленный поселок на Аляске, который из-за последствий потепления климата необходимо перенести в другое место [25]



Рис. 7. Город Уткиагвик – самый северный населенный пункт на Аляске, ранее известный как Барроу (фото любезно предоставлено Википедией)

Таким образом, эрозия затрагивает целые населенные пункты, включая взлетно-посадочные полосы, и их, возможно, придется переносить дальше в сторону суши. Это также вызовет необходимость строительства новых дорог. Альтернативой могло бы быть более частое использование вертолетов с аэродромами базирования, расположенными вдали от уязвимых мест.

В Норвежском университете естественных и технических наук в городе Тронхейм было изучено использование геомешков для защиты береговой линии от эрозии (рис. 8) [31]. Был сделан вывод, что геотекстиль должен быть достаточно прочным, чтобы противостоять воздействиям, которым он подвергается, и что потребуется ежегодная замена утеранных мешков.

Выбор методов устойчивой защиты арктических населенных пунктов от береговой эрозии является очень сложной

задачей, особенно там, где берега сложены слабыми грунтами. Однако вложение средств в защиту может оказаться весьма экономичным по сравнению с переносом всего населенного пункта или переселением всех его жителей.

Обсуждаемые в этой статье проблемы следует рассматривать также с точки зрения гидравлики арктических водотоков, ранее рассмотренной в статье автора [32]. Так, берега рек из-за таяния многолетней мерзлоты разрушатся, в результате чего эти реки станут шире, а эродированный материал осядет ниже по течению, что приведет к образованию песчаных или илистых отмелей и создаст проблемы для речного транспорта.

Таким образом, таяние многолетней мерзлоты и его последствия вызывают огромные опасения у всех арктических сообществ и хозяев инфраструктуры [26, 27]. А близость к морю (или реке). –



Рис. 8. Использование геомешков для уменьшения береговой эрозии было протестировано в месте расположения шахты «Свеагрува» («Свеа») на Шпицбергене [31]

ред.) значительно усугубляет эти проблемы для прибрежных населенных пунктов из-за ожидаемого усиления эрозии берегов.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ТАЯНИЕМ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ И БЕРЕГОВОЙ ЭРОЗИЕЙ В АРКТИКЕ ▶

Затраты на перенос населенного пункта должны быть очень большими, поскольку он требует перемещения и/или нового строительства всей инфраструктуры. Например, стоимость переноса поселка Кивалина была оценена в 1 млн долларов США на каждого его жителя [33]. А защитные мероприятия и ремонт защитных сооружений или уже пострадавшей инфраструктуры приведут к высоким эксплуатационным расходам, но вложение средств будет меньше до тех пор, пока не потребуются перенос населенного пункта или переселение его жителей.

Однако автор исходит из понимания того, что политика большинства стран заключается в заселении всей своей территории по стратегическим соображениям. Поэтому для определения судьбы арктических населенных пунктов, находящихся под угрозой последствий потепления климата, необходим тщательный экономический и стратегический анализ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ▶

Из приведенных выше примеров и обсуждений можно сделать вывод, что более теплый климат создает большие проблемы для арктических прибрежных населенных пунктов. Угрозу для зданий и сооружений представляют эрозия береговой линии и разрушение утесов, сложенных глиной или песком. Разрабатываются и реализуются различные стратегии управления по борьбе с береговой эрозией, однако в некоторых случаях окончательным решением может быть перенос всего населенного пункта. Иногда денежных вложений может ока-

заться недостаточно для уменьшения эрозии или переноса поселения – тогда его жителям, возможно, придется переехать в более крупные и лучше защищенные населенные пункты.

При оценке эрозии необходимо учитывать все факторы, влияющие на ее развитие и скорость. К ним относятся высота волн, растущая из-за увеличения длины их разгона при отступании льда, отсутствие или недостаток ледяного покрова для защиты от штормов ранней осенью, а также штормовые нагоны, повышающиеся из-за увеличения площади свободных ото льда акваторий между берегом и кромкой льда. Для более долгосрочного анализа необходимо дополнительно принять во внимание возможное повышение среднего уровня моря. Кроме того, к важным факторам, влияющим на эрозию, относится ускорение таяния многолетней мерзлоты береговой линии из-за повышения температуры воздуха в Арктике, что делает берега более восприимчивыми к ударам волн и воздействию штормовых нагонов.

Технические и экономические проблемы для арктических прибрежных населенных пунктов действительно огромны. Чтобы ответственные органы власти смогли разработать устойчивую политику в этом отношении, необходимо более глубокое понимание процессов береговой эрозии и таяния многолетней мерзлоты [34]. Автор надеется, что данная статья будет полезна для учета факторов и потенциала этих процессов в целях предотвращения их возможных последствий на территориях арктических населенных пунктов. **И**

Перевод выполнен при поддержке АНО «НООСФЕРА».

Источник для перевода ▶

(Source for the translation) ▶

Gudmestad O.T. Technical and economic challenges for Arctic coastal settlements due to melting of ice and permafrost in the Arctic // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 612. Proceedings of the 6th International Conference on Water Resource and Environment (WRE 2020), Tokyo, Japan, 23–26 August 2020. Article 012049. DOI:10.1088/1755-1315/612/1/012049. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/612/1/012049/pdf.

Список литературы, использованной автором переведенной статьи ▶

(References used by the author of the translated article) ▶

1. Arctic Sea Ice News & Analysis. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2018.
2. O'Rourke M.J.E. Archaeological site vulnerability modelling: the influence of high impact storm events on models of shoreline erosion in the Western Canadian Arctic // Open Archaeology. 2017. Vol. 3. P. 1–16.
3. Sinitsyn A., Guegan E. Investigations of coastal erosion rates and mechanisms in Varandey area, Barents Sea // Proceedings of the 4th European Conf. on Permafrost, Evora, Portugal, 2014. P. 276.
4. Sinitsyn A., Guegan E., Kokin O., Vergun A.P., Udalov L., Ogorodov S. Investigations of coastal erosion processes in Varandey area, Barents Sea // Proceedings of the SPE Conference “Arctic and Extreme Environments”, Moscow, Russia, Society of Petroleum Engineers, 2013.

5. Ogorodov S.A., Baranskaya A.V., Belova N.G., Kamalov A.M., Kuznetsov D.E., Overduin P.P., Shabanova N.N., Vergun A.P. Coastal dynamics of the Pechora and Kara seas under changing climatic conditions and human disturbances // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. Vol. 3. № 9. P. 53–73.
6. Guegan E. *Erosion of Permafrost Affected Coasts: Rates, Mechanisms and Modelling*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015.
7. Gudmestad O.T. The changing climate and the arctic coastal settlements // *Int. J. of Env. Impact*. 2018. Vol. 1. № 4. P. 411–419.
8. Fang Z, Freeman P.T., Field C.B., Mach K.J. Reduced sea ice protection period increases storm exposure in Kivalina, Alaska // *Canadian Publishing Science*. 2019. Vol. 4 № 4. P. 525–537.
9. *Coastal Engineering Manual*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers, 2006.
10. Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 164. Article 102790.
11. Kostopoulos D., Yitzhak E., Gudmestad O.T. *Coastal Erosion due to Decreased Ice Coverage and Associated Increased Wave Action* (London: Intech-Open, 2018).
12. Fritz H.M. et al. Hurricane Katrina storm surge reconnaissance // *J. Geotechnical Geoenvironmental Eng.* 2008. Vol. 4. № 5. P. 644–656.
13. Kohno N. Phenomena of storm surges and its risk // *Proceedings of the ESCAP/WMO Typhoon Committee Roving Seminar*. Viet Nam: Hanoi, 2016.
14. Kohno N., Dube S.K., Entel M., Fakhruddin S.M.H., Greenslade D., Leroux M.D., Rhome J., Thuy N. Recent progress in storm surge forecasting // *Tropical Cyclone Research and Review*. ESCAP/WMO Typhoon Committee (TC), Shanghai Typhoon Institute of China Met. Adm. (STI/CMA), 2018. Vol. 7. № 2. P. 128–139.
15. *Guide to Storm Surge Forecasting*. World Met. Organization, 2011.
16. Bird E.C.F. *The Effects of a Rising Sea level on Coastal Environments*. Chichester: John Wiley & Sons, 1993.
17. Yitzak E. *Permafrost Shore Erosion in a Warmer Climate*. Norway: University of Stavanger, 2018.
18. Ravens T., Peterson S. *Arctic Coastal Erosion Rates*. Singapore: World Scientific, 2018.
19. Ahmad N., Bihs H., Chella M.A., Kamath A., Arntsen O.A. CFD Modelling of Arctic Coastal Erosion due to Breaking Waves // *Int. J. Offshore Polar Engr.* 2019. Vol. 29. № 1. P. 33–41.
20. Kintish E. *A New Geologic Hazard Threatens Alaska's Pipeline* // *Science Magazine*. Washington, DC: Pulitzer Centre on Crisis Reporting, 2015.
21. Gertseema M., Clague J.J. *Pipeline Routing in Landslide-prone Terrain* // *Research Seminar Series*. 2011.
22. Setsa R. *Jordskred ved Alta Geofarer*. Heggedal: GeoPublishing AS, 2020.
23. Verdens G. Nytt ras i Alta – Undersøkelsene Fortsetter // *Altaposten*. 2020 URL: altaposten.no/nyheter/i/RynJrA/nytt-ras-i-alta-undersokelsene-fortsetter.
24. Schiermeier Q. *Huge landslide triggered rare Greenland mega-tsunami* // *Nature News*. Berlin: Springer, 2017.
25. Humpert M. *Permafrost Thaw will Force Greenland's Kangerlussuaq Airport to Close to Most Commercial Traffic in 2024*. *Arctic Economy*, 2019.
26. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E., Nelson F.E., Etzelmuller B., Luoto M. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. Article 5147.
27. Marttila H., Bailey H., Ala-Aho P., Welker J., Mustonen K.R., Klove B. // *Arctic Freshwater*. Finland: University of Oulu, 2019.
28. Williams A.T., Rangel-Buitrago N., Pranzini E., Anfuso G. The management of coastal erosion // *Ocean Coast. Manage.* 2018. Vol. 156. P. 4–20.
29. Robinson M. *This remote Alaskan village could disappear under water within 10 years - here's what life is like there* // *Business Insider*. 27.09.2017. URL: businessinsider.in/politics/this-remote-alaskan-village-could-disappear-under-water-within-10-years-heres-what-life-is-like-there/slidelist/60858975.cms.
30. Hamilton L.C., Saito K., Loring P.A., Lammers R.B., Huntington H.P. Climigration? Population and climate change in Arctic Alaska // *Population Environ.* 2016. Vol. 38. P. 115–133. DOI:10.1007/s11111-016-0259-6.
31. Caline F. *Coastal sea ice action on a breakwater in a microtidal inlet in Svalbard*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2010.
32. Gudmestad O.T. *Cold region hydrology* // *Handbook of Engineering Hydrology* (ed. by S. Eslamian). USA: CRC press, Taylor and Francis, 2014.
33. *Relocating Kivalina* // *US Climate Resilience Toolkit*. 2020. URL: toolkit.climate.gov/case-studies/relocating-kivalina.
34. Overduin P.P., Strzelecki M.C., Grigoriev M., Couture N., Lantuit H., St-Hilaire-Grave D., Gunther F., Wetterich S. *Coastal Changes in the Arctic*. London: Geological Society, 2014.