

## **Ретроспективный анализ гидрометеорологических и ледовых условий в прибрежно-шельфовой зоне: динамически активный период, ледовитость, энергия ветровых волн**

В рамках Задачи 1 «Ретроспективный анализ (за последние 40 лет) гидрометеорологических и ледовых условий в прибрежно-шельфовой зоне: ледовитость, динамически активный период, энергия ветровых волн» проведен сбор, обобщение и анализ данных гидрометеорологических и ледовых условий в прибрежно-шельфовой зоне Печорско-Карского сектора Российской Арктики с 1979 по 2021 гг. (с начала спутниковых наблюдений на ледяным покровом Северного полушария). Для 10 арктических гидрометеорологических станций, расположенных в прибрежной зоне Баренцева и Карского морей, были проведены расчеты динамически активного периода, длины разгона и энергии ветровых волн. Получены характеристики межгодовой изменчивости различных гидрометеорологических параметров, имеющих значение для моделирования динамики берегов: среднегодовая температура воздуха, годовая накопленная положительная среднесуточная температура воздуха, число дней с положительными среднесуточными температурами, среднегодовая скорость ветра и повторяемость штормов, повторяемость волноопасных направлений ветра; продолжительность и даты начала и окончания безледного периода. Восстановлены многолетние ряды температуры, скорости и направления ветра; получены даты начала и конца безледного периода на гидрометеорологических станциях; выполнены расчеты изменчивости температурного и волноэнергетического компонентов; рассчитан индекс таяния - годовая сумма положительных среднесуточных температур.

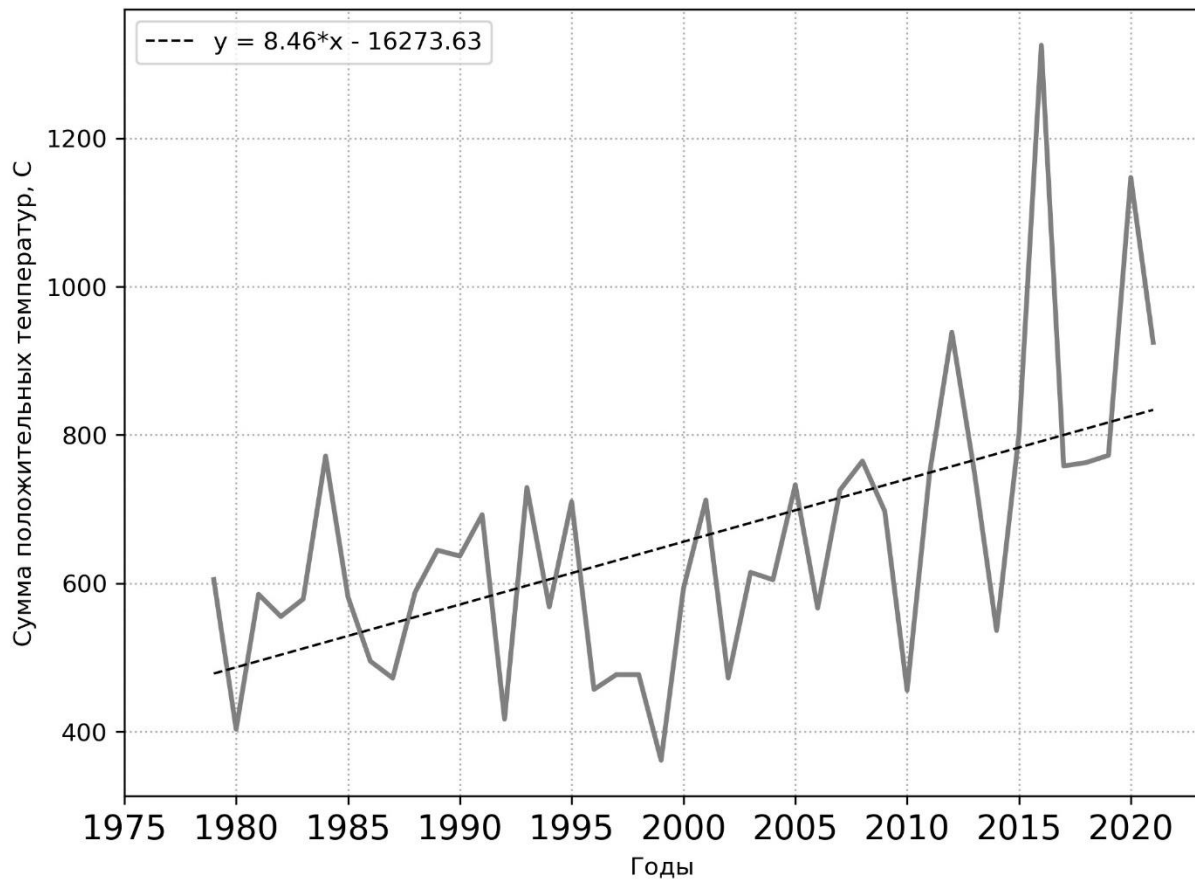
**Таблица 1.** Местоположение арктических станций и постов

| <b>№</b> | <b>Название станции</b>  | <b>Широта (с.ш.)</b> | <b>Долгота (в.д.)</b> |
|----------|--------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1        | о. Колгуев               | 69,087               | 48,234                |
| 2        | Варандей                 | 68,834               | 58,116                |
| 3        | Амдерма                  | 69,760               | 61,665                |
| 4        | Усть-Кара                | 69,250               | 64,930                |
| 5        | Байдарацкая губа, запад  | 68,852               | 66,904                |
| 6        | Байдарацкая губа, восток | 69,304               | 68,056                |
| 7        | Марресаля                | 69,710               | 66,800                |
| 8        | Харасавей                | 71,146               | 66,819                |
| 9        | Попова                   | 73,317               | 70,050                |
| 10       | Сабетта                  | 71,244               | 72,121                |

Для расчета термического потенциала разрушения берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, использованы данные наблюдений о среднесуточной температуре воздуха с гидрометеорологических станций (ГМС), ближайших к ключевым участкам. Архивы высокого качества доступны для большого числа арктических станций, поэтому им было отдано предпочтение перед данными реанализов [Shabanova et al., 2018]. Для оценки влияния термической составляющей были рассчитаны индексы таяния и замерзания (air thawing и air freezing index) [Andersland, Ladanyi, 2004], представляющие собой накопленную сумму среднесуточных температур теплого и холодного периодов соответственно. Накопленные величины отражают сумму энергии, переданную берегу из окружающей среды (или отнятой у него в случае отрицательных температур), поэтому они лучше подходят для анализа теплового воздействия на арктические берега. Ежегодные суммы положительных температур для 10 станций были получены на основе данных реанализа ERA-5 (Hersbach et al., 2020). Для данных ближайших к положению станций модельных данных ERA-5 по данным часового разрешения были получены сначала среднесуточные значения, а затем рассчитаны суммы положительных температур за год в градусоднях (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Сумма положительных температур (пример), 1979-2021 гг.: а) Варандей; б) Харасавэй

Безлёдный период определяется тремя важнейшими характеристиками: датами начала/окончания периода и его общей продолжительностью (рис. 2). Продолжительность безлёдного периода определяет временной интервал, когда берег активно подвергается волновому воздействию и механическому разрушению волнами. Кроме того, безлёдный период коррелирует с температурой воздуха, которая, в свою очередь, определяет скорость оттаивания мерзлых пород и интенсивность термоденудации. Поэтому даты начала/окончания и продолжительность безлёдного периода являются важными индикаторами для климатического мониторинга процессов в прибрежной зоне. Даты начала/окончания безлёдного периода представлены в виде целого числа, который соответствует «номеру дня в году» от начала года. Продолжительность безлёдного периода оценивается в сутках. Тенденции характеристик безлёдного периода приводятся в единицах «сут/10 лет».

Характеристики безлёдного периода были получены на основе спутниковых данных о сплоченности морского льда национального центра льда и снега США, NSIDC, массив Climate Data Records, ID: G02202, Version 4 (Meier et al., 2021). Выделение безлёдного периода проводилось с помощью модифицированного порогового метода, адаптированного для данных прибрежной зоны арктических морей РФ (Шабанов, 2022; Shabanov & Shabanova, 2020).



a)

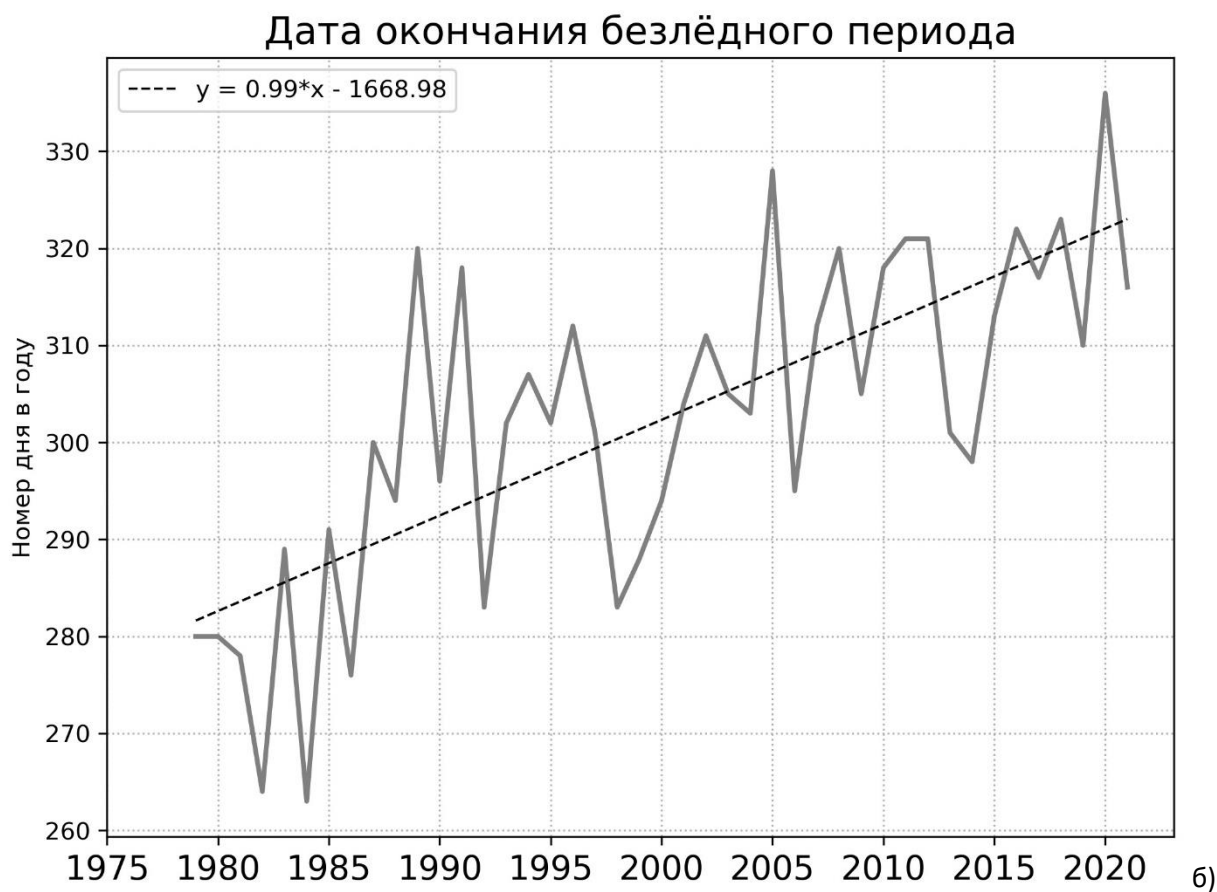


Рис. 2. Даты начала (а), окончания (б) и продолжительность (в) безледного периода в юго-западном секторе Карского моря 1979-2021 (акватория к западу от ГМС Марресалья, пример)

В Печорско-Карском регионе доминируют ветровые волны. Поэтому для оценки воздействия волнового фактора на берега был использован ветроэнергетический метод. В отличие от термического потенциала разрушения мерзлых берегов, для расчетов которого использовались данные наблюдений на ГМС, для вычисления волно-энергетического потенциала требуются данные о скорости и направлении ветра высокого временного разрешения (3 ч). Такие архивы доступны для меньшего числа станций и часто имеют пропуски и несоответствия (иногда до 50% безледного периода имеют пропуски или переход на более редкие измерения). Скорость и направление приземного ветра были получены из данных реанализа последнего поколения ERA-5 (Hersbach et al., 2020), в наибольшей степени детально характеризующий ветроэнергетический режим каждого из ключевых участков. Ветро-волноэнергетический потенциал разрушения берегов был определен с помощью автоматизированного программного комплекса, реализующего метод расчета энергии ветровых волн Попова-Совершаева (Попов, Совершаев, 1982). Входными данными для этих расчётов являются данные батиметрии (GEBCO, 2020) и длины разгона волноопасных румбов (рис. 3), продолжительности безлёдного периода и скорости и направления ветра.

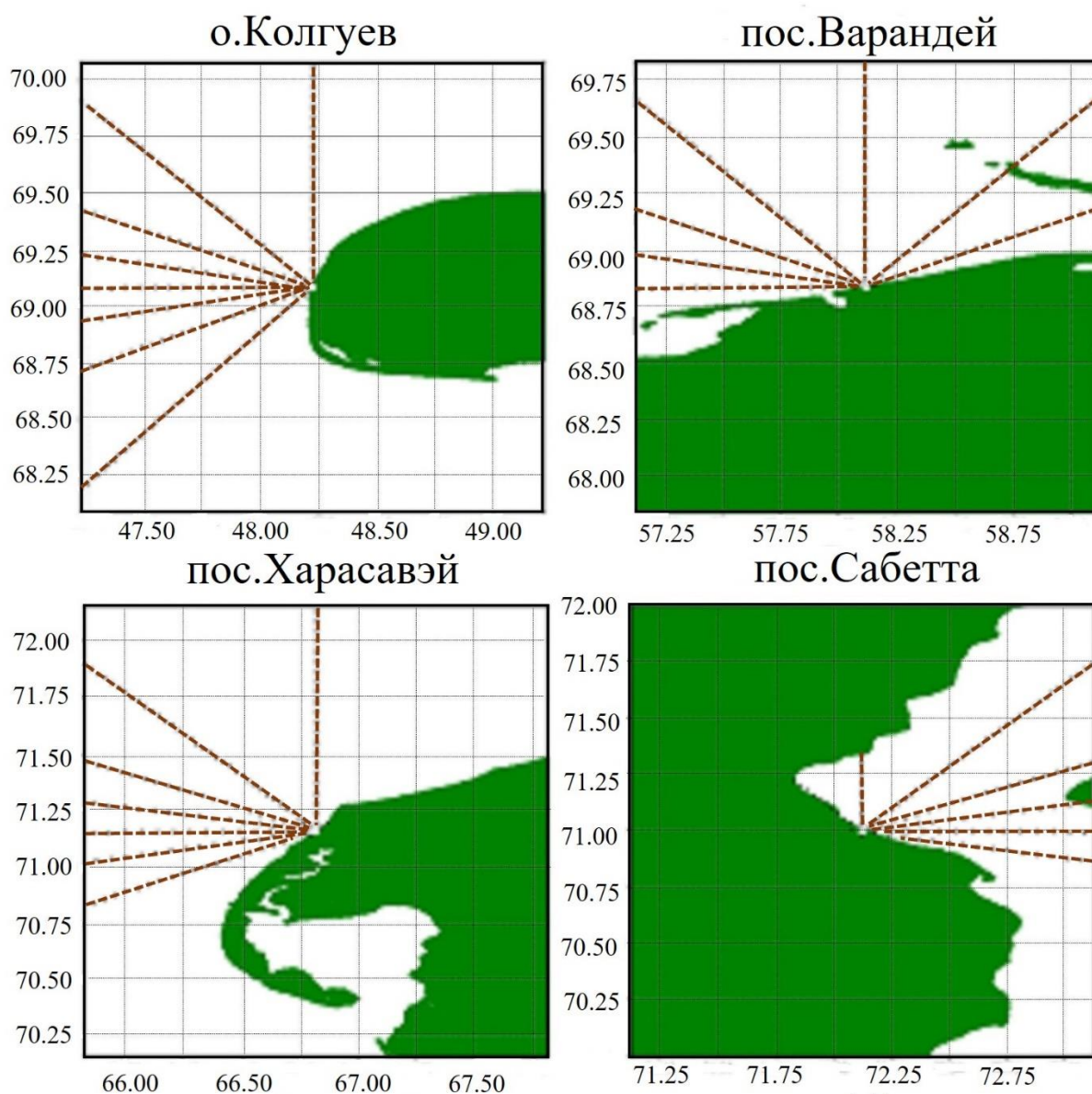


Рис. 3. Определение секторов волноопасных румбов на основании ЦМР GEBCO (пример)

По итогам выполненных расчетов установлено, что на всех рассмотренных станциях прибрежно-шельфовой зоны Печорско-Карского сектора Российской Арктики продолжительность безлёдного периода статистически значимо увеличилась за период 1979-2021 гг. Темпы изменений составили +10+25 сут/10 лет. Такие тренды, отнесённые к средним оценкам продолжительности безлёдного периода, свидетельствуют об относительных изменениях в 8-18%/10 лет. Продолжительность безлёдного периода расширяется как за счёт смещения дат начала периода на более ранние сроки, так и за счёт смещения дат окончания периода на более поздние сроки. Оба процесса являются статистически значимыми, их темпы оцениваются в -6-12 сут/10 лет и +1+13 сут/10 лет для дат начала и окончания периода соответственно. В относительных единицах это составляет -3-8%/10 лет и +1+4%/10 лет соответственно. На всех рассмотренных станциях сумма положительных температур воздуха статистически значимо увеличилась за период 1979-2021 гг. Изменения составили от +8 до +12°C-дней/год. В относительных единицах, такие изменения соответствуют 9-20%/10 лет относительно средней оценки за 1979-2021 гг. Ветро-волноэнергетический потенциал разрушения термоабразионных берегов, рассчитанный по методу Попова-Совершаева, за период 1979-2021 гг. статистически значимо увеличился на всех станциях (рис. 4), кроме о. Колгуев и Сабетта. В процентном выражении, ветро-волноэнергетический потенциал увеличился на +20+40%/10 лет относительно средней оценки за период 1979-2021 гг. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о существенных направленных изменениях всех основных гидрометеорологических характеристик, имеющих критически важное значение для моделирования динамики арктических берегов. Данные за последние годы (2019-2021 гг.) актуализируют полученные ранее оценки.



Рис. 4. Энергия ветровых волн, у.е., 1979-2021, Печорское море, район пос.Варандей (пример)

## Литература

1. Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of Western Russian Arctic coastal dynamics: XX-century history and current state // Geography, Environment, Sustainability. 2018; 11(1): 113-129. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129>
2. Шабанов П.А. Изменения продолжительности безлёдного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 518–531.
3. GEBCO Compilation Group (2022) GEBCO\_2022 Grid. doi:10.5285/e0f0bb80-ab44-2739-e053-6c86abc0289c
4. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis // Q J R Meteorol Soc. 2020.V. 146. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
5. Meier W., Fetterer F., Windnagel A., Stewart J. NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 4. [G02202]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/efmz-2t65>. 2017. [03.11.2022]
6. Shabanov P., Shabanova N. Ice-free period detection method in the Arctic coastal zone // Russ. J. Earth. Sci. 2020. V. 20. ES6016. doi:10.2205/2020ES000725
7. Попов Б.А., Совершаев В.А. Некоторые черты динамики арктических берегов Азии. - Вопросы географии, 1982, № 119.