

Гидрометеорологический потенциал динамики берегов

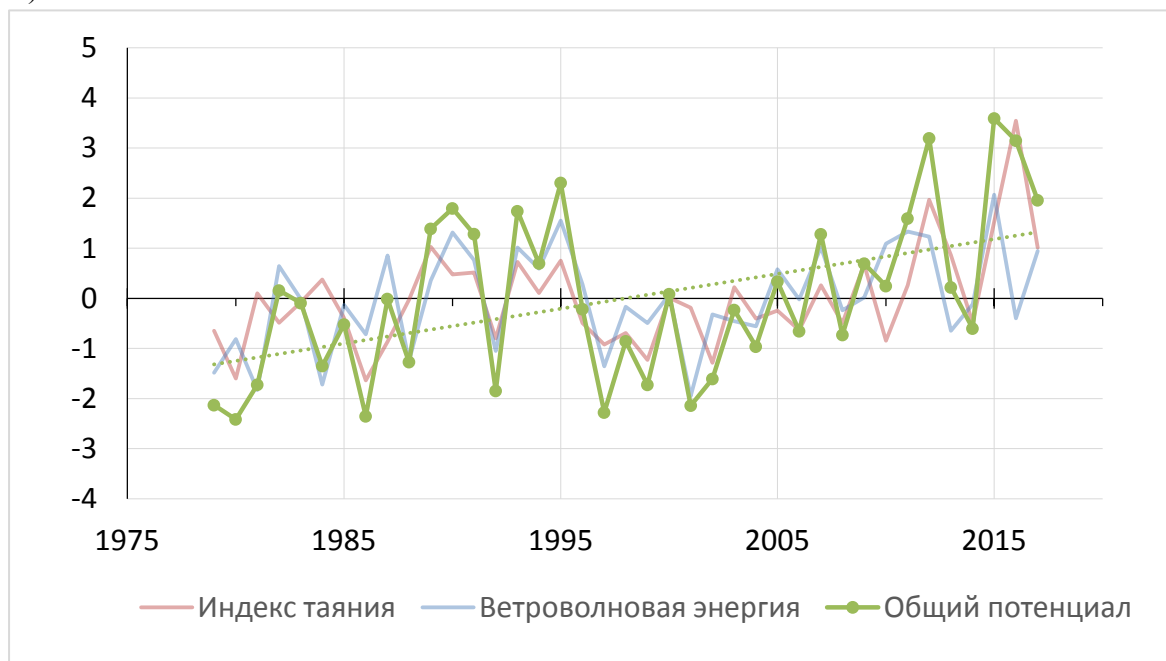
Оценка временной изменчивости основных гидрометеорологических факторов динамики берегов.

Аналогично графикам изменения ветроволновой энергии и индекса таяния, полученным в течение первого года работы над Проектом для Харасавэя и Марре-Сале, те же параметры были рассчитаны для Уральского и Ямальского берегов Байдарацкой губы. Для этих двух участков были вычислены изменения общего гидрометеорологического потенциала динамики берегов, учитывающего и температурный, и волноэнергетический фактор (рис. 13). Нам удалось вычислить этот параметр непосредственно для участков мониторинга динамики берегов, а не для станции Марресале, как планировалась изначально, благодаря использованию данных реанализов.

В целом, согласно нашим оценкам, к 2016 году общий гидрометеорологический потенциал увеличился по сравнению с 1980ми годами примерно на 100%. Индекс таяния вырос на 40-45% (6,65 - 7 градусо-дней в год для Ямальского и Уральского берега, соответственно). Ветроволновая энергия усилилась на 55-60%. Рост ветроволновой энергии вызван, главным образом, расширением безледного периода на 40 дней (50%) для Уральского берега и 25 дней (35%) для Ямальского берега за 40 лет.

В 1997-2004 г. наблюдался минимум как общего потенциала, так и ветроволновой энергии и индекса таяния, характерный для всего Баренцевоморско-Карского региона. Этот минимум был связан с ослаблением западных и северо-западных ветров, наиболее волноопасных для данного региона и несущих тепло. 1989-1996 гг. и 2005-2017 гг. характеризовались положительными аномалиями. В некоторые последние годы (2012, 2015 и 2016) гидрометеорологический потенциал динамики берегов был особенно высок за счет очень теплого лета. В то же время, были и относительно "спокойные" холодные и маловетренные года, такие, как 2013 и 2014 г.

А)



Б)

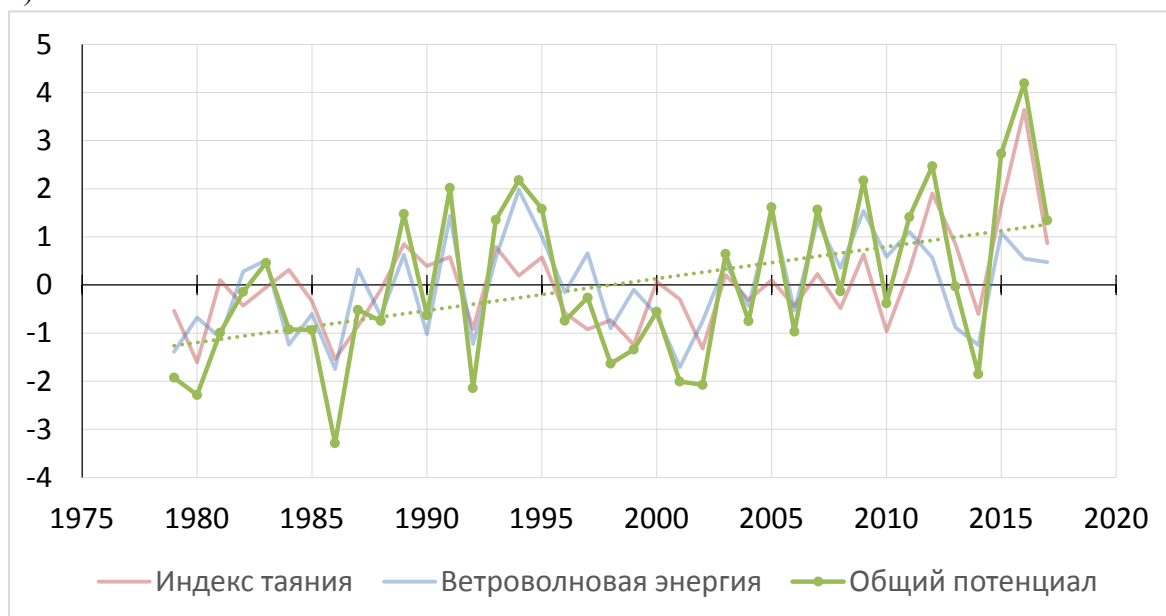


Рис. 13. Временная изменчивость гидрометеорологических факторов динамики берегов для Уральского (А) и Ямальского (Б) берега Байдарацкой губы: индекс таяния, ветроволновая энергия и общий гидрометеорологический потенциал (выраженные в аномалиях, разделенных на стандартное отклонение). Пунктирная линия показывает тренд общего гидрометеорологического потенциала динамики берегов

Корреляционный анализ межгодовой изменчивости термического и волноэнергетического факторов динамики берегов с временной изменчивостью скоростей отступания берегов и прогноз отступания берегов ключевых участков

При сравнении данных изменчивости температуры и ветроволновой энергии с изменчивостью скоростей отступления берегов для ключевых участков побережья Карского моря заметно, что каждый из этих факторов по отдельности не дает корреляции с темпами термоабразии. К примеру, аномально теплый год при низкой волновой энергии не даст значительного отступления, как и год с высокой штормовой активностью, но без повышения температур. Однако определенная закономерность прослеживается: в случае совпадения максимума волновой энергии и термического фактора всегда наблюдается значительное отступление.

Для возможности прогноза динамики берегов необходимо определить общий температурно-волноэнергетический эффект, определяемый как совместное влияние температуры и ветроволновой энергии. Однако для этого необходимо количественно оценить вклад каждого из этих двух факторов в динамику берегов конкретного участка.

Значения скоростей отступления берега, накопленных положительных температур и энергии ветровых волн сильно различаются по порядку. Это соответственно порядки первого десятка (до 10 м/год), первые десятки (30 - 40°С в год) и сотни тысяч (500 000 - 1 млн т/год). Кроме того, эти параметры сильно отличаются по дисперсии. Чтобы провести совместный анализ разномасштабных величин, производится нормировка их отклонений от среднего (формула 7):

$$Rr_n = \frac{Rr_i - \overline{Rr}}{\sigma_{Rr}}, \quad WE_n = \frac{WE_i - \overline{WE}}{\sigma_{WE}}, \quad T_n = \frac{T_i - \overline{T}}{\sigma_T}. \quad 7)$$

Нормированные величины имеют нулевое среднее значение и стандартное отклонение, равное 1. В системе XY-координат два нормированные значения позволяют определить коэффициент корреляции между исходными параметрами. Если расположить один параметр по оси X, а второй по оси Y и аппроксимировать получившиеся точки прямой $Y = kX + b$, то коэффициент k угла наклона этой прямой представляет собой коэффициент корреляции между исходными параметрами.

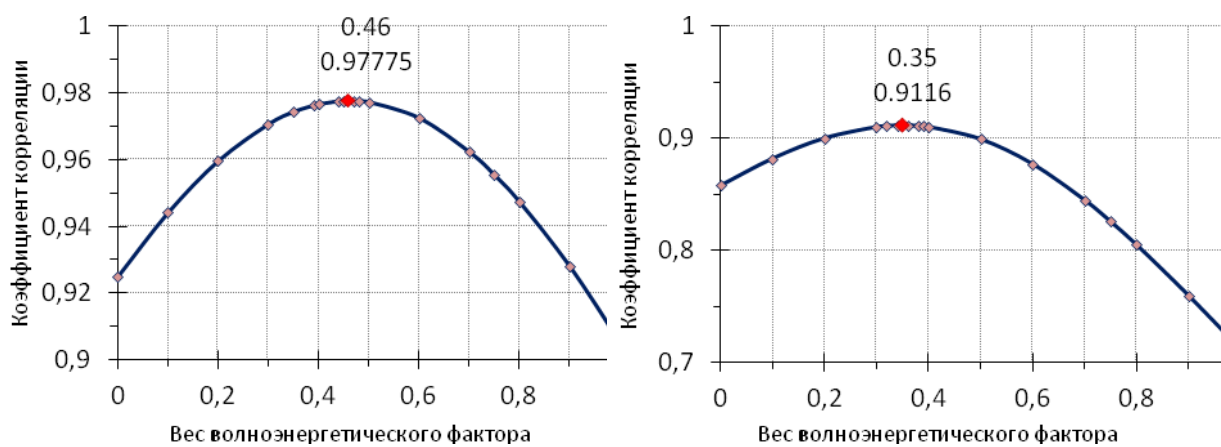
Термический и энергетический факторы действуют одновременно, взаимно усиливая и ослабляя друг друга. Скорость отступления берегов при прочих равных ожидается высокой в том случае, если большое количество ветро-волновой энергии поступает на оттаявший вследствие высоких положительных температур берег. Для оценки суммарного гидрометеорологического эффекта предложен параметр (TE) в виде суммы температуры и ветро-волновой энергии с весами ($W_{WE} + W_T = 1$):

$$TE = W_{WE} * WE_n + W_T * T_n. \quad 8)$$

Нормализованные значения TE (TE_n) исследованы совместно с нормализованными значениями скоростей отступления берегов (Rr_n).

Коэффициент корреляции между TE and Rr изменяется в зависимости от весов W_{WE} и W_T . Эти веса подбираются таким образом, чтобы коэффициент корреляции был максимален. Зависимость коэффициента корреляции от весов представляет собой

параболическую функцию (рис. 14), которая имеет единственный максимум. Значение W_{WE} , соответствующее максимуму этой функции определяет соотношение термического и энергетического факторов динамики берегов в данном районе.



А)

В)

Рис. 14. Зависимость коэффициента корреляции между скоростью отступления берегов (Rr) и суммарным термо-энергетическим эффектом (TE) от веса волно-энергетического фактора (W_{WE}).

А) Ямальский берег Байдарацкой губы; В) Уральский берег Байдарацкой губы

Корреляция между скоростью отступления берега и ветро-волновой энергией на Ямальском берегу Байдарацкой губы составляет 90,5% (значимо на уровне значимости 0,05). При этом 82% дисперсии скорости отступления вызвано вариациями ветро-волновой энергии (рис. 15А). Корреляция с температурным фактором составляет 92,5%. Если предположить, что вариации ветро-волновой энергии влияют на скорость отступления берегов с весом 0,46, а остальное отступление происходит за счёт термоденудации (из-за изменений температуры), то коэффициент корреляции между скоростью отступления берегов и суммарным гидрометеорологическим (термо-энергетическим) фактором достигает 97,8%. При этом 95,5% дисперсии скорости отступления описывается вариациями этого фактора (рис. 15А и 15В).

Рисунки 15, 16 С и D представляют межгодовую изменчивость скорости отступления берегов и определяющих её факторов (накопленных положительных среднемесячных температур, ветро-волновой энергии и рассчитанного суммарного термо-энергетического эффекта).

Определив связь скорости отступления берегов Rr_n с вариациями определяющих её факторов (накопленных положительных среднемесячных температур T_n и ветро-волновой энергии WE_n), можно количественно определить реакцию скорости отступления на изменение факторов. Коэффициент корреляции связывает приращение суммарного термо-энергетического эффекта ΔTE_X , вызванного изменением фактора X (температуры или волновой энергии) с приращением скорости отступления ΔRr_X :

$$\frac{\Delta Rr_X}{\sigma_{Rr}} = corr * TE_{nX} = corr * \frac{\Delta TE_X}{\sigma_{TE}}. \quad 9)$$

В свою очередь, нормированное на стандартное отклонение приращение суммарного термо-энергетического эффекта ΔTE_X определяется нормированным же приращением изменившегося фактора ΔX , взятым с его весом W_X :

$$\Delta TE_X = W_X \Delta X \frac{\sigma_{TE}}{\sigma_X}. \quad (10)$$

Таким образом, нормированное приращение скорости отступления берегов может быть представлено как взвешенное произведение коэффициента корреляции и нормированного приращения определяющего фактора:

$$\frac{\Delta Rr_X}{\sigma_{Rr}} = corr * \frac{\Delta TE_X}{\sigma_{TE}} = corr * \frac{W_X \Delta X \frac{\sigma_{TE}}{\sigma_X}}{\sigma_{TE}} = corr * W_X \frac{\Delta X}{\sigma_X}. \quad (11)$$

Если предположить приращение определяющего фактора на величину, равную его стандартному отклонению ($\Delta X = \sigma_X$), то приращение отступления берега будет определяться взвешенным коэффициентом её корреляции с указанным фактором и дисперсией скорости отступления:

$$\Delta Rr_X = corr * W_X \Delta X \sigma_{Rr}. \quad (12)$$

Эта формула справедлива в случае сохранения остальных факторов динамики берегов постоянными.

Для Ямальского берега вес термического фактора составляет 0.54, а стандартное отклонение - 2.3°C. Стандартное отклонение скорости отступления берегов – 0.38 м/год, а коэффициент корреляции с термическим фактором - 0.978. Таким образом, приращение скорости отступления берега при увеличении накопленных положительных среднемесячных температур на 2.3°C следует ожидать в районе 20 см/год: $\Delta Rr_T = 0.978 \times 0.54 \times 0.38 = 0.2$ м/год. Однако полученная зависимость скорости отступления от суммарного термо-энергетического эффекта описывает не 100%, а 95,6% вариации скорости отступления (рис. 15В). Поэтому полученную величину следует поместить в интервал значений ($\pm 4,4\%$). В нашем случае этот интервал составляет лишь $\pm 0,044 \times 0,2 / 0.956 \approx 0.01$ м / год, то есть в пределах точности наблюдений, поэтому мы пренебрегаем этой поправкой.

При увеличении ветро-волновой энергии на 480 тыс.тонн (на её стандартное отклонение), приращение скорости отступления берегов составит $\Delta Rr_{WE} = 0.978 \times 0.46 \times 0.38 = 0.17$ м/год ~ 15 см/год

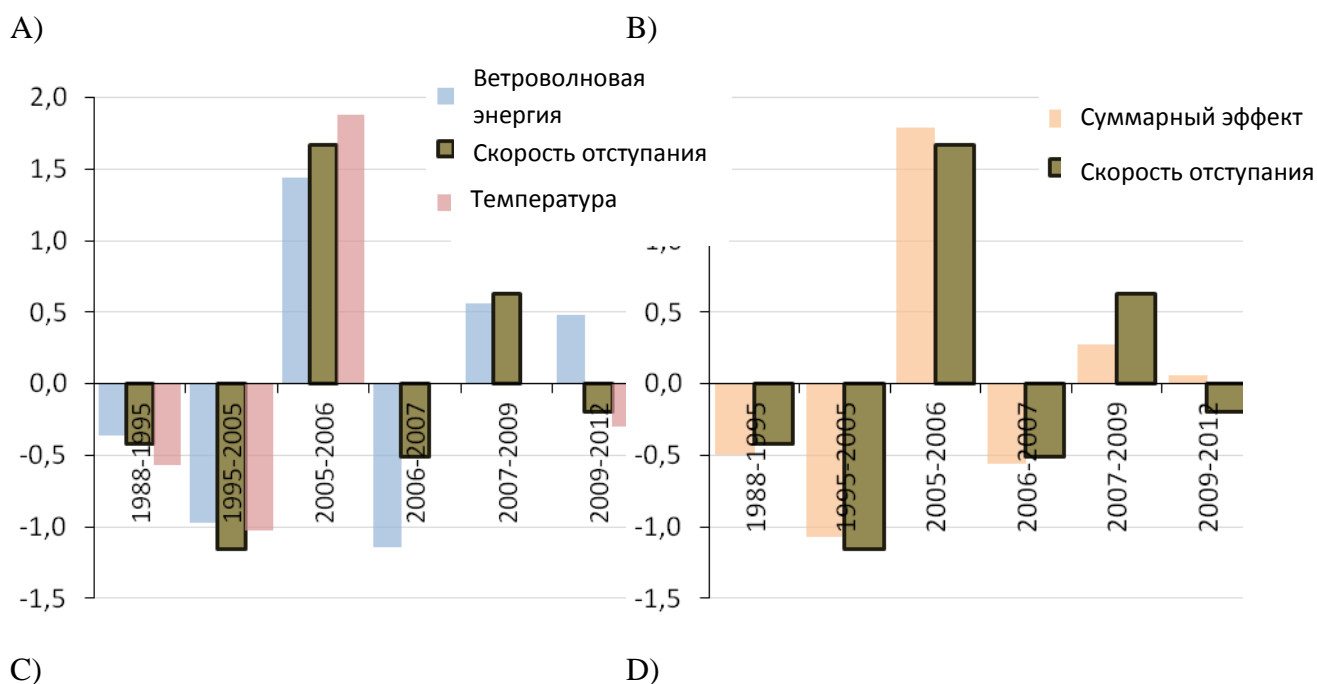
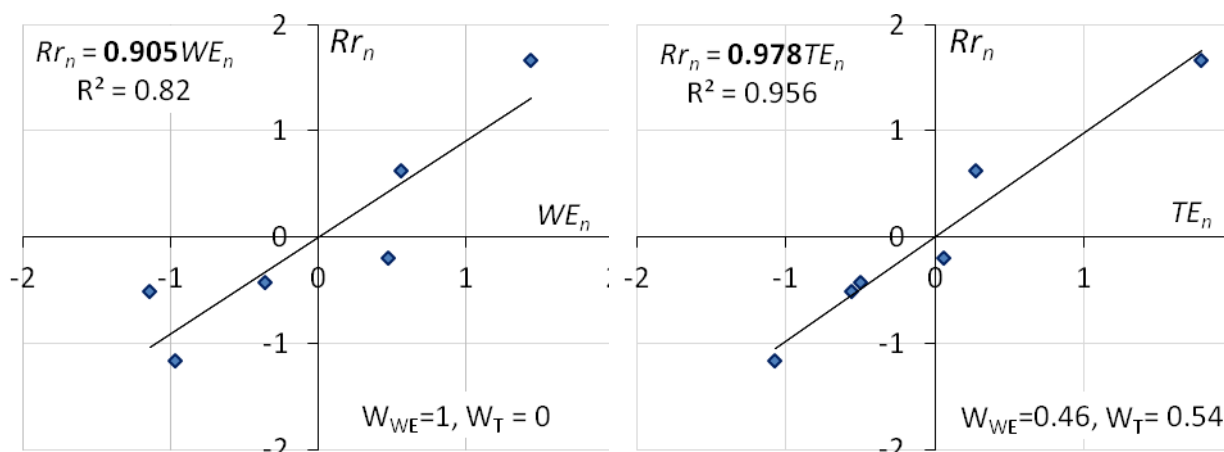


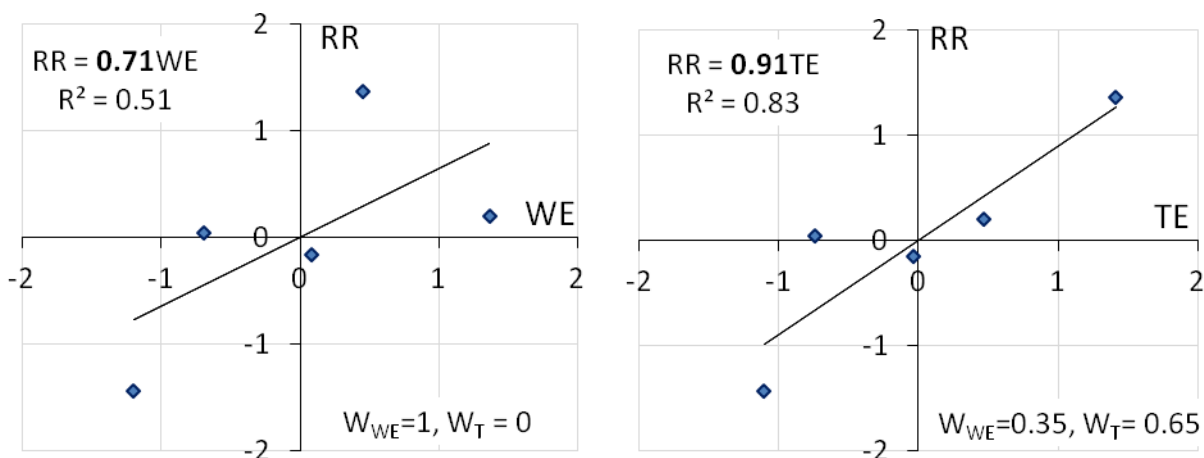
Рис. 15. Ямальский берег Байдарацкой губы. Скорость отступления берегов в сравнении с ветро-волноэнергетическим и термическим фактором и их суммарным эффектом. Представлены нормализованные величины.

А) Корреляция скорости отступления и энергетического фактора (вес энергетического фактора принят за 1, а термического за 0); В) корреляция скорости отступления и суммарного термо-энергетического эффекта (вес энергетического фактора $W_{WE}=0.46$, а термического $W_T=0.54$, см. рис. 1.4.8А). Жирный шрифт – коэффициент корреляции, R^2 – коэффициент вариации. С) Нормализованные значения скорости отступления берегов, термического и ветро-волноэнергетического факторов в различные периоды; Д) нормализованные значения скорости отступления берегов и суммарного температурно-ветро-волноэнергетического эффекта ($TE = 0.46WE_n + 0.54T_n$)

На Уральском берегу Байдарацкой губы термический эффект, согласно полученным с помощью рисунка 14 В весам, выражен сильнее, чем на Ямальском. Вес

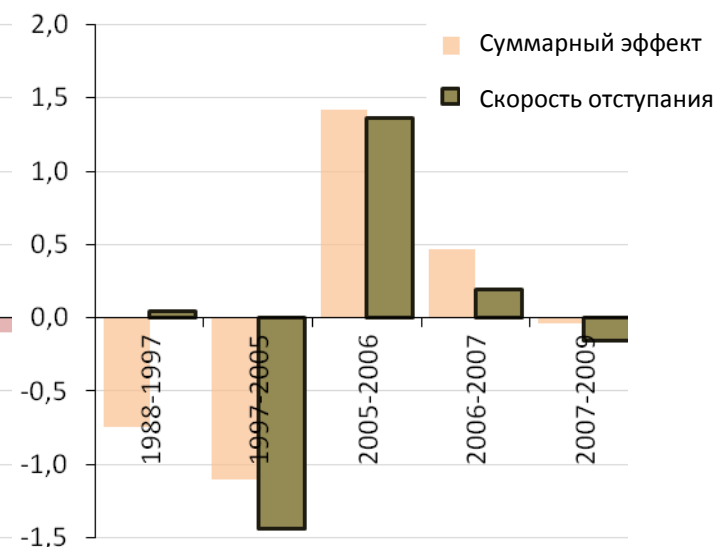
термического фактора равен 0.65, $\sigma_{RR} \approx 0.57$ м/год, а коэффициент корреляции – 0.91 (рис. 16В). Таким образом, приращение скорости отступления берега при увеличении накопленной за год положительной среднемесячной температуры на 2.3°C составит $\Delta Rr_T \sim 0.35$ м/год (почти в 2 раза больше, чем на Ямальском берегу). Коэффициент вариации на Уральском берегу составляет 0.82, поэтому 18% изменчивости скорости отступления (0.07 м/год) здесь не определяется полученной нами формулой. Поэтому полученное значение ΔRr_T следует заключить в интервал $0.28 \leq \Delta Rr_T \leq 0.42$ м/год.

При приращении ветро-волновой энергии на её стандартное отклонение (780 тысяч тонн), приращение скорости отступления берега составит $\Delta Rr_{WE} = 0.91 \times 0.35 \times 0.57 = 0.18$ м/год или, с учётом коэффициента вариации, будет находиться в интервале 0.18 ± 0.035 ($\pm 18\%$), т.е. 15 – 22 см/год.



A)

B)



C)

D)

Рис. 16. Уральский берег Байдарацкой губы. Скорость отступления берегов в сравнении с ветро-волноэнергетическим и термическим фактором и их суммарным эффектом. Представлены нормализованные величины.

А) Корреляция скорости отступления и энергетического фактора (вес энергетического фактора принят за 1, а термического за 0); В) корреляция скорости отступления и суммарного термо-энергетического эффекта (вес энергетического фактора $W_{WE}=0.35$, а термического $W_T=0.65$, см. рис. 1.4.8В). Жирный шрифт – коэффициент корреляции, R^2 – коэффициент вариации. С) Нормализованные значения скорости отступления берегов, термического и ветро-волноэнергетического факторов в различные периоды; D) нормализованные значения скорости отступления берегов и суммарного ветро-волноэнергетического эффекта ($TE = 0.35WE_n + 0.65T_n$)

Таким образом, увеличение накопленных за год положительных среднемесячных температур на $2,3^{\circ}\text{C}$ на Уральском берегу вызовет увеличение скорости отступления берега на $\sim 30 - 40$ см/год, а на Ямальском берегу – на 20 см/год. Такое различие в реакции двух берегов на потепление объясняется более высоким содержанием льда на Уральском берегу. Более высокая чувствительность Уральского побережья к изменениям температуры отражена в объективно полученных весах термического фактора в суммарном эффекте: на Урале он составляет 0.65, а на Ямале –0.54 на побережье Ямала.

В то же время на Ямальском берегу оттаявший грунт легче удаляется, нежели на Уральском: чтобы удалить 15 см берега здесь потребуется 480 тысяч тонн ветро-волновой энергии против 780 тысяч тонн на Уральском берегу.

Таким образом,

- Для моделирования скоростей отступления берегов необходимо использовать общий показатель температурно-волноэнергетического эффекта, включающий комбинацию температуры и волновой энергии. Эта комбинация определяется соответствующими весовыми коэффициентами для каждого из перечисленных двух параметров, индивидуальными для отдельного ключевого участка. Коэффициенты определяются по результатам калибровки для конкретного ключевого участка с имеющимися данными прямого мониторинга. С помощью корреляционного анализа подбираются оптимальные коэффициенты веса волноэнергетического фактора и температурного фактора для данного участка, после чего появляется возможность расчетов изменчивости общего температурно-волноэнергетического эффекта (TE) и прогноза поведения скоростей термоабразии при тех или иных температурных и волноэнергетических условиях.

- Количественно показано, что Уральский берег Байдарацкой губы более чувствителен к температурному фактору, чем Ямальский (полученные весовые коэффициенты температуры составляют 0,65 и 0,54 соответственно). Это связано с более высокой льдистостью отложений Уральского берега.

- Установлено, что увеличение годовой накопленной положительной среднесуточной температуры воздуха на 2.5°C вызовет увеличение скоростей отступления на 20 см/год на Ямальском берегу и 30-40 см/год на Уральском берегу.

- Для увеличения скорости отступления на 15 см/год необходимо 780 тыс. условных единиц ветроволновой энергии для Уральского берега и 480 - для Ямальского.