

МОДЕЛЬ РЕКОНСТРУКЦИИ МАКРОЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ В XX СТОЛЕТИИ (на примере Варандейской береговой области)¹

Ведущим фактором, определяющим направленность и интенсивность развития берегов арктических морей, является ветроволновой режим. В условиях незначительных величин уровня приливов и низкой тектонической активности с ветроволновыми характеристиками связаны основные черты динамики берегоформирующих процессов и литодинамического режима прибрежной зоны [1–10]. Изменчивость ветроволновых характеристик определяется особенностями процессов атмосферной циркуляции в регионе. Динамика макроциркуляционных процессов в атмосфере моделируется последовательным и закономерным чередованием элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ). ЭЦМ – типовой циркуляционный процесс в течение которого в северном полушарии сохраняется географическое распределение барического поля определенного типа, направленность основных переносов воздушных масс [11–17]. С соответствующими ЭЦМ ветроволновыми энергетическими режимами, таким образом, связаны интенсивность и направленность геоморфологических процессов в прибрежной зоне арктических морей.

Методика исследований

Исследовались рассчитанные С.А. Огородовым (доклад в НИЛ геоэкологии Севера Географического ф-та МГУ, 2005) по стандартной методике [1, 7–9, 18, 19] для динамически активного периода (с 15 августа по 31 октября) характеристики ветроволновой энергии для Варандейской береговой области (прибрежная зона Большеземельской тундры, участок побережья Печорского моря от о-ва Песякова на западе до п-ова Медынский Заворот на востоке) с 1981 по 2002 гг. [10, 18–22]. В соответствии с данной методикой основу расчета составляет определение секундного потока волновой энергии на 1 м длины фронта волны по полученному для условий мелководного моря уравнению [8]:

$$\mathcal{E}_{0\text{мелк}} = 2 \times 10^{-6} \left(\frac{gH}{V_{10}^2} \right)^{1.4} V_{10}^5,$$

где V_{10} – анемометрическая (истинная) скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря (по данным срочных метеонаблюдений), м/с; $\left(\frac{gH}{V_{10}^2} \right)$ – безразмерное соотношение

между глубиной H по направлению разгона ветра и его скоростью V_{10} ; g – ускорение силы тяжести; размерность числового коэффициента соответствует размерности ρ/g

(ρ – плотность, т/м^3), т.е. $\frac{\text{тм}}{\text{мс}^3}$, в соответствии с чем $\mathcal{E}_{0\text{мелк}}$ имеет размерность $\frac{\text{тм}}{\text{мс}}$, или

т/с , как это принято в исследованиях динамики береговой зоны [6–9, 20–22]. Далее, для перехода от секундного потока энергии к среднемноголетней месячной величине энергий всех волнений данного румба, величины $\mathcal{E}_{0\text{мелк}}$, рассчитанные для всех градаций скоростей ветра каждого направления, умножаются на выраженную в секундах суммарную продолжительность ветров соответствующей градации за данный месяц.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 03-05-64281).

Полученные величины суммируются в пределах каждого морского румба, в результате чего получаются румбовые среднемноголетние величины суммарной энергии волнений за расчетный месяц. Суммированием этих величин в пределах безледного (динамически активного) периода находятся среднемноголетние румбовые потоки ветроволновой энергии. Геометрическим сложением полученных румбовых составляющих (путем построения энергетических многоугольников) получают энергетическую равнодействующую (векторная сумма) волнений на морской границе береговой зоны.

Все значения энергетических характеристик (векторных сумм) для удобства расчетов были уменьшены в 10^4 раз. Вычитанием из отдельных годовых значений характеристик ветроволновой энергии среднего многолетнего для всего временного ряда значения была получена знакопеременная функция, отражающая динамику ветроволновой энергии относительно среднего многолетнего значения. Таким образом, были определены годы с отрицательной (относительного среднего многолетнего) и положительной аномалиями ветроволновой энергии, а также сами значения аномалий ветроволновой энергии. По календарю последовательной смены ЭЦМ [11–13, 16] были составлены годовые (с 1981 по 2002 гг.) выборки ЭЦМ за аналогичные динамически активные периоды (15 августа – 31 октября). Затем рассчитывались интегральные среднегодовые спектры распределения продолжительности отдельных ЭЦМ (в сутках) для годов с положительными и отрицательными аномалиями ветроволновой энергии. Полагая, что связанная с отдельными ЭЦМ ветроволновая энергия вносит определенный энергетический вклад в формирование как положительных, так и отрицательных аномалий годовых значений ветроволновой энергии, рассчитывалась пропорция ветроволнового энергетического вклада для каждого ЭЦМ. Расчеты основывались на данных интегральных среднегодовых спектров распределения продолжительности отдельных ЭЦМ по годам с отрицательными и положительными аномалиями значений ветроволновых энергетических характеристик (таблица). Пропорция ветроволнового энергетического вклада ЭЦМ была принята в качестве “ключа” к реконструкции характеристик ветроволновой энергии. С использованием пропорции вклада был исследован начальный массив характеристик ветроволновой энергии за период с 1981 по 2002 гг. Полученные с учетом пропорциональности вклада аномалии продолжительности ЭЦМ по отдельным годам исследуемого периода в 20 из 22 случаев имели тот же знак, что и рассчитанные ранее аномалии годовых значений характеристик ветроволновой энергии. То есть тенденция вклада ЭЦМ с вероятностью 0.91 соответствует формированию знака аномалии характеристик ветроволновой энергии. Полагая, что суммарная за анализируемый период аномалия вкладов ЭЦМ соответствует суммарной аномалии ветроэнергетических характеристик, был рассчитан коэффициент пропорциональности между данными аномалиями (4.68). Умножением годовых аномалий энергетического вклада ЭЦМ на коэффициент пропорциональности были получены реконструированные на основе пропорции вклада значения аномалий ветроэнергетических характеристик. Сложением значений годовых аномалий ветроэнергетических характеристик со среднемноголетним значением были получены реконструированные годовые значения ветроэнергетических характеристик. Реконструированные значения коррелируются с исходными с коэффициентом корреляции 0.85 (рис. 1). Полученная в результате проверки “ключа” высокая степень корреляционной связи (при небольшой продолжительности исходного ряда) позволила принять рассчитанную для Варандейской береговой области пропорцию ветроволнового энергетического вклада в качестве способа реконструкции характеристик ветроволновой энергии этого региона.

По данным календаря последовательной смены ЭЦМ [11–13, 15, 16] была составлена выборка продолжительности отдельных ЭЦМ за динамически активный (принимая за него интервал с 15 августа по 31 октября) период для каждого года с 1899 по 1981 гг. Далее, полагая, что энергетический вклад отдельных ЭЦМ оставался постоянным (иначе, изменялась только продолжительность или сочетание различных ЭЦМ в динамически активный период от года к году) и применяя полученную ранее пропорцию

Пропорция энергетического вклада ЭЦМ в формирование аномалий ветроволновой энергии

Тип элементарного циркуляционного механизма (ЭЦМ) по [11]	Энергетический вклад ЭЦМ в формирование аномалии ветроволновой энергии	
	>0	<0
1а	1.000	0.000
1б	0.000	1.000
2а	0.091	0.909
2б	0.450	0.550
2в	0.784	0.216
3	0.214	0.786
4а	1.000	0.000
4б	0.472	0.528
4в	0.462	0.538
5а	1.000	0.000
5б	1.000	0.000
5в	1.000	0.000
5г	0.680	0.320
6	0.571	0.429
7аз	1.000	0.000
7ал	0.375	0.625
7бз	0.000	0.000
7бл	0.400	0.600
8а	0.409	0.591
8бз	1.000	0.000
8бл	0.500	0.500
8вз	0.529	0.471
8вл	0.413	0.587
8гз	0.500	0.500
8гл	0.167	0.833
9а	0.333	0.667
9б	0.333	0.667
10а	0.300	0.700
10б	0.360	0.640
11а	0.565	0.435
11б	0.667	0.333
11в	0.000	1.000
11г	0.867	0.133
12а	0.228	0.772
12бз	0.333	0.667
12бл	0.171	0.829
12вз	0.000	0.000
12вл	0.170	0.830
12г	0.750	0.250
13з	0.560	0.440
13л	0.589	0.411
ВТ	0.000	1.000

вклада, были рассчитаны аномалии ветроэнергетических вкладов ЭЦМ, а умножением на коэффициент пропорциональности получены значения аномалий ветроволновых характеристик. Алгебраическим сложением этих значений со среднемноголетним были получены реконструированные значения характеристик ветроволновой энергии за период с 1899 по 1981 гг. (рис. 2).

Результаты исследований

Для анализа результатов исследований рассчитывались годовые аномалии реконструированных значений ветроволновых характеристик. Расчет проводился вычитанием среднемноголетнего значения характеристик ветроволновой энергии из рекон-

Ветроволновая энергия (m/c)

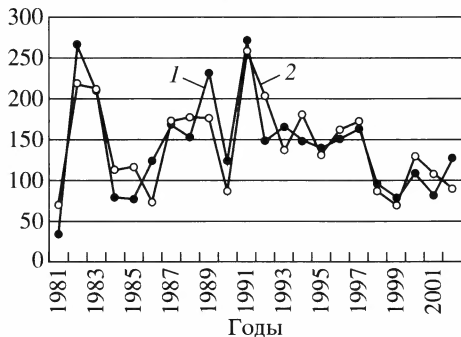


Рис. 1. Динамика ветроволновой энергии в Варандейской береговой области за период с 1981 по 2002 гг. Усл. обозначения см. рис. 2

Ветроволновая энергия (m/c)

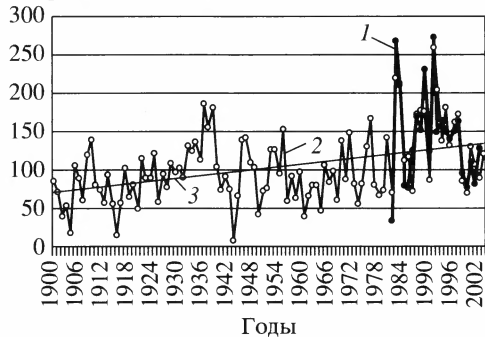


Рис. 2. Динамика ветроволновой энергии в Варандейской береговой области за период с 1899 по 2003 гг.

Динамика: 1 – рассчитанная по методике Б.А. Попова, В.А. Совершаева, [22], 2 – реконструированная, 3 – линейный тренд

Отклонения от среднего

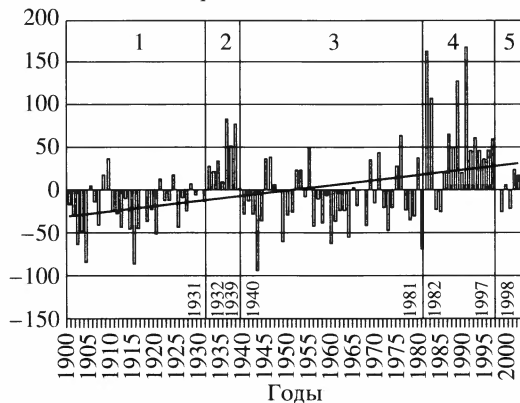


Рис. 3. Аномалии ветроволновой энергии от среднего многолетнего значения и ветроволновые эпохи

Отступление берегов, м

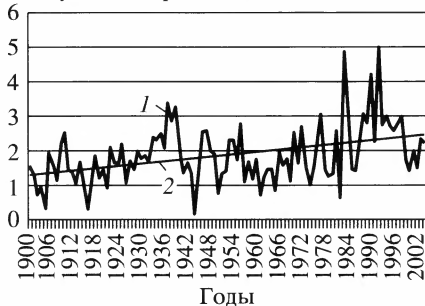


Рис. 4. Динамика скорости отступления берегов (1) в XX столетии в Варандейской береговой области и линейный тренд (2)

струированных годовых значений, начиная с 1899 года. График полученных таким образом аномалий представлен на рис. 3. Отступление берега на абразионном участке в районе п. Варандей за период с 1987 по 2000 гг. составило 36 м [21]. Суммарная ветроволновая энергия за этот период характеризуется величиной $1972.2 m/c$. Таким образом, из пропорции следует значение энергии ($54.78 m/c$), соответствующее отступанию берега на 1 м. Исходя из этого, на основе реконструированных рядов ветроволновой энергии, осуществлен расчет отступления берега для абразионных участков. Результаты расчетов представлены на рис. 4. В среднем отступание абразионных берегов составляет $1.87 м$ в год. Общее отступление абразионных берегов в районе п. Варандей за столетие составляет 194 м. Отмечается тенденция в увеличении темпов их отступления. Коэффициент линейного тренда составляет $0.0106 м/год$. При этом, на фоне общего увеличения темпов отступления берегов, определяются эпохи существенных изменений темпов денудации. Всего на протяжении XX столетия можно выделить 5 последовательных эпох. Первая (1900–1931 гг.) характеризуется небольшими темпами денудации. В среднем в эту эпоху береговая линия на абразионных участках берегов отступает на $1.45 м$ (рис. 5). Вторая эпоха (1932–1939 гг.) характеризуется интен-



Рис. 5. Средние значения скорости отступления абразионных берегов в Варандейской береговой области для отдельных эпох



Рис. 6. Кумулятивная кривая (1) и линейная аппроксимация (2) отступления абразионных берегов в XX столетии в Варандейской береговой области

сивной денудацией абразионных берегов. Среднегодовое отступление береговой линии составляет 2.58 м, при максимальном значении 3.39 м. Третья эпоха (1940–1981 гг.) отражает снижение скорости отступления абразионных берегов. Среднегодовая величина отступления составляет 1.63 м. С четвертой эпохой (1982–1997 гг.) связан очередной этап усиления разрушения береговой зоны на абразионных участках. В среднем за год отступление берегов в этот период составляет 298 м, при максимальном значении 4.95 м. Пятая эпоха (с 1998 г.) характеризуется среднегодовым значением отступления береговой линии на абразионных участках, равным 1.85 м. Таким образом, для XX столетия, на фоне общего усиления денудационных процессов на абразионных участках береговой зоны, характерно чередование продолжительных (32 и 42 лет) эпох со среднегодовыми значениями отступления берегов от 1.45 до 1.63 м и непродолжительных (8 и 16 лет) периодов интенсивной денудации берегов со среднегодовым отступанием от 2.58 до 2.98 м. По рассчитанным данным была построена кумулятивная кривая отступления береговой линии на абразионных участках в районе п. Варандей для XX столетия (рис. 6). График отступления аппроксимируется линейной функцией $y = 1.779x - 5$, которая может использоваться для приблизительных расчетов отступления береговой линии.

Выводы

1. Для реконструкции характеристики ветроволновой энергии в прибрежной зоне арктических морей предложен метод, основанный на определении пропорции циркуляционного вклада ЭЦМ (в типизации Б.Л. Дзердзеевского) в аномалии ветроволновой энергии в динамически активные периоды.

2. Применение метода позволило реконструировать характеристики ветроволновой энергии и динамики абразионных берегов Варандейской береговой области за период с 1899 по 2003 гг. На общем фоне усиления темпов отступления берегов в XX веке в Варандейской береговой области отмечается последовательное чередование эпох с различными темпами отступления и имеющими, вероятно, в качестве важнейших причин как глобальные, так и региональные изменения в циркуляции атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геоэкология Севера (введение в геокриоэкологию) / В.И. Соломатин. М.: Изд-во МГУ, 1992. 270 с.
2. Ещенко Л.А., Шишилова Л.М. О причинах вариаций межгодовой активности динамики береговой зоны // Эволюция берегов в условиях поднятия океана. М.: Изд-во МГУ, 1992. С. 57–69.
3. Ещенко Л.А., Рязанцев Г.Б., Шишилова Л.М. Морфодинамические тенденции на аккумулятивных берегах на фоне смены типов атмосферной циркуляции // Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геоэкология (м-лы XXI межд. береговой конф.). Калининград: Изд-во КГУ, 2004. С. 87–90.

4. *Жиндарев Л.А., Хабидов А.Ш., Шербина В.В.* Особенности литодинамики песчаных берегов бесприливных морей и управляющая модель береговой зоны // Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геозология (м-лы XXI межд. береговой конф.). Калининград: Изд-во КГУ, 2004. С. 34–38.
5. *Луговой Н.Н., Мысливец В.И.* Геоморфология берегов юго-восточной части Баренцева моря // Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геозология (м-лы XXI межд. береговой конф.). Калининград: Изд-во КГУ, 2004. С. 107–111.
6. *Попов Б.А.* Наносодвижущий и абразионный эффекты морского волнения // Береговая зона моря. М.: Наука, 1981. С. 53–61.
7. *Попов Б.А., Совершаев В.А.* Некоторые черты динамики арктических берегов Азии // *Вопр. географии.* Сб. 119. Морские берега. М.: Мысль, 1982. С. 105–116.
8. *Попов Б.А.* Принципы оценки устойчивости береговой зоны и дна моря // *Исслед. устойчивости геосистем Севера.* М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 167–175.
9. *Попов Б.А., Совершаев В.А., Новиков В.Н. и др.* Береговая зона морей Печорско-Карского регионов // *Исслед. устойчивости геосистем Севера.* М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 176–190.
10. *Совершаев В.А.* Расчет суммарной волновой энергии при штормовых нагонах // *Теоретические проблемы развития морских берегов.* М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 28–33.
11. *Дзержевский Б.Л.* Общая циркуляция атмосферы и климат (избранные труды). М.: Наука, 1975. 288 с.
12. *Дзержевский Б.Л.* Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии // М-лы метеорологических исслед. М.: Наука, 1968. 240 с.
13. *Кононова Н.К.* Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применение в гляциологии // М-лы гляциологических исслед. 2003. № 95. С. 45–65.
14. *Федоров В.М.* Макроциркуляционная модель реконструкции динамики баланса массы ледников Норвегии в XX столетии // М-лы гляциологических исслед. 2006. № 100. С. 69–75.
15. *Циркуляционные механизмы современных колебаний климата* // К.В. Кувшинова. М.: Наука, 1987. 192 с.
16. *Копонова Н.К.* Fluctuations of Northern Hemisphere atmospheric circulation in 1899–2002 // *Proceedings of the International Conference "Mathematical Methods in Geophysics".* Novosibirsk. 2003. Part II. P. 405–408.
17. *Савина С.С., Хмелевская Л.В.* Динамика атмосферных процессов северного полушария в XX столетии // М-лы метеорологических исслед. (циркуляция атмосферы). М.: Наука, 1984. № 9. 142 с.
18. *Новиков В.Н., Федорова Е.В.* Разрушение берегов в юго-восточной части Баренцева моря // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География.* 1989. № 1. С. 64–68.
19. *Морская геоморфология. Терминологический справочник. Береговая зона: процессы, понятия, определения* // В.П. Зенкович, Б.А. Попов. М.: Мысль, 1980. 280 с.
20. *Огородов С.А.* Морфодинамическое районирование береговой зоны Печорского моря // *Геоморфология.* 2003. № 1. С. 72–78.
21. *Огородов С.А.* Динамика абразионных берегов, сложенных малоальдистыми дисперсными отложениями, в глобальных изменениях природной среды и климата // *Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геозология.* (м-лы XXI межд. береговой конф.). Калининград: Изд-во КГУ, 2004. С. 51–52.
22. *Попов Б.А., Совершаев В.А.* Принципы выбора исходных данных для расчета потоков волновой энергии // *Береговая зона моря.* М.: Изд-во МГУ, 1981. С. 47–53.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
15.03.2005

MACROCIRCULATING MODEL AND RECONSTRUCTION OF ARCTIC SEAS' SHORE DYNAMICS IN THE XX CENTURY (VARANDEY SHORE OF BARENTS SEA AS AN EXAMPLE)

V.M. FEDOROV

S u m m a r y

A method for reconstruction wind-and-wave energy and the dynamics of the Arctic seas shorelands is put forward. The method is based on proportional correlations of wind-and-wave energy characteristics anomalies and duration of elementary circulating mechanisms (in the classification of B.L. Dzerdzeyevsky) during the dynamically active periods. With the use of this method the wind-and-wave energy characteristics and dynamics of abrasion shores in Varandey region were reconstructed for the period 1899–2003. The row obtained expresses the changes of intensity and trends of geomorphic processes within the coastal zone of the Pechora Sea.

The general for XX century tendency of the wind-and-wave energy and shore recession velocity growth is shown. The cause for it may lie in the growth of the near-surface temperature gradient in the system "ocean-continent" taking place due to different warming-up in the course of global climate warming. Against the background of the general for XX century tendency, the stages with different velocities of energy growth and shore recession may be traced at the sites of abrasion.