

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И ЛЕДОВИТОСТИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ НА ДИНАМИКУ БЕРЕГОВ ЕВРАЗИИ

С.А. ОГОРОДОВ

Московский государственный университет

Примерно половина протяженности арктического побережья Евразии сложена мерзлыми дисперсными отложениями различной степени льдистости. Динамика таких берегов определяется, главным образом, сочетанием и взаимодействием термического и волно-энергетического факторов. Роль термического фактора увеличивается с увеличением льдистости береговых отложений. При низком содержании льда волно-энергетический фактор становится определяющим. В статье представлены примеры анализа влияния волновой энергии и температурного режима на динамику двух типов берегов. Первый тип представлен береговыми барьерами и косами, которые сложены песчаными отложениями с низким содержанием льда. Для таких берегов выявлена четкая зависимость между объемом волновой энергии, приходящей на внешнюю границу береговой зоны, и величинами абразии. Второй тип представлен типичными термоабразионными берегами, сложенными песчаными и глинистыми среднельдистыми отложениями. Динамический режим данного типа берега определяется как энергией волн, так и термическим режимом.

Береговая зона арктических морей России в XXI веке становится объектом первоочередного освоения в связи с необходимостью создания производственной инфраструктуры по добыче, хранению и транспорту полезных ископаемых, прежде всего, углеводородов. Уже сейчас 92 % добычи природного газа в России осуществляется за полярным кругом. Со временем будут осваиваться все более северные, все более труднодоступные месторождения, в том числе и в пределах прибрежно-шельфово́й зоны арктических морей, где именно природные условия диктуют правила стратегического планирования развития территории. В сложившихся условиях детальное понимание природных процессов, протекающих в береговой зоне на фоне глобальных изменений климата, имеет стратегическое значение для России.

Береговая зона моря, как область взаимодействия гидросферы, атмосферы и литосферы, исключительно динамична. Гидрометеорологические, в том числе литодинамические и ледовые процессы, протекающие здесь, являются одним из главных факторов, определяющих выбор места под строительство инженерных объектов как на акватории, так и на берегу. В XXI веке в условиях глобального изменения климата неизбежно должны произойти заметные изменения гидрометеорологических характеристик приземного слоя атмосферы, которые в свою очередь приведут к изменениям в гидросфере и литосфере. Снизится продолжительность ледового сезона, вместе с тем одновременно активизируется динамика льда, увеличится его торосистость, и, вероятно, в результате усилится воздействие дрейфующих в ледяных полях торосистых образований на дно. Увеличение продолжительности динамически активного периода приведет к усилению воздействия волн на берег, что, несомненно, скажется на динамике берегов, вызвав усиление их абразии. Произойдут и другие изменения гидрометеорологических характеристик, связанные с прохождением глубоких циклонов, изменением волновой активности и высоты штормовых нагонов, которые также отразятся в динамике береговых процессов.

Несмотря на короткий динамически активный период, морфолитодинамические процессы в береговой зоне арктических морей отличаются высокой динамичностью, обусловленной низкой устойчивостью берегов, сложенных дисперсными многолетнемерзлыми породами и развивающимися под влиянием термоабразивного процесса. Около половины протяженности береговой линии арктического побережья Евразии подвержено разным формам термоабразивного процесса и отступает со средней скоростью от 1 до 5 м/год. Динамика типичных термоабразивных берегов в общем виде определяется сочетанием и взаимодействием термического и волно-энергетического факторов.

Термическое воздействие выражается в передаче энергии к мерзлым породам, слагающим берега, в результате контакта с воздухом и водой, температура которых выше нуля по Цельсию. Соответственно, чем выше температура воздуха и воды и чем дольше продолжительность периода с положительными температурами воздуха и контакта с морской водой, температура которой выше нуля, тем заметнее влияние термического фактора на динамику берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами.

Воздействие волно-энергетического фактора проявляется в прямом механическом воздействии морских волн на берега. Соответственно эффект влияния этого фактора определяется как интенсивностью, так и продолжительностью штормовых волнений. В свою очередь, интенсивность волнения в значительной степени зависит от длины разгона волн (местоположения границы распространения ледового покрова) и продолжительности динамически активного периода, когда акватория свободна ото льда.

В условиях глобального изменения климата и ледовитости арктических морей, прогнозируемых на XXI век, влияние на динамику термоабразивных берегов как термического, так и волно-энергетического факторов неизбежно возрастет. Усиление термоабразии будет иметь место как за счет термического фактора в результате более интенсивного оттаивания мерзлых грунтов под действием более высоких температур воздуха и воды, возможного увеличения количества осадков, так и за счет увеличения волнового воздействия на берег, рост которого обусловлен увеличением повторяемости штормовых ветров, расширением динамически активного периода и повышением уровня моря.

Из вышесказанного следуют цель и задачи исследования: дать оценку воздействия активных гидрометеорологических факторов на процессы разрушения берегов, сложенных различными типами мерзлых дисперсных отложений, в том числе:

- определить вклад термического фактора;
- определить вклад волно-энергетического фактора;
- оценить влияние изменений термического режима на ледовитость морей и ветро-волно-энергетические характеристики береговой зоны.

Для решения поставленных задач мы проанализировали влияние активных гидрометеорологических факторов на примере двух типов берегов, имеющих широкое распространение в наиболее хорошо изученном Печорско-Карском регионе Евразии.

Первый тип представлен берегами, сложенными мерзлыми песчаными отложениями с низким содержанием льда [1, 4]. Как правило, это берега крупных береговых аккумулятивных форм, сформировавшихся в голоцене, – береговых барьеров и так называемых баров-кос.

При оттаивании мерзлых пород отложения, слагающие такие берега, не проседают, не подвержены оползневым процессам, термоэрозии и термокарсту. Береговые уступы хорошо держат отвесную стенку, склоновые процессы здесь развиваются медленно. С инженерно-геологических позиций такие бары часто являются весьма привлекательными для строительства жилых и промышленных объектов, естественно, как правило, по сравнению с окружающими сильнозаболоченными тундровыми равнинами. Так как термоабразивный эффект здесь не развит, основным фактором динамики таких берегов должен быть волновой, а не термический.

Для анализа влияния активных гидрометеорологических факторов на динамику таких берегов был выбран район о. Варандей, где имеется ГМС и достаточно длительный период ведутся наблюдения за динамикой берегов. Первый параметр, который был проанализирован, — температура воздуха. Мы рассчитали сумму среднемесячных температур теплого периода года и сопоставили с результатами наблюдений за динамикой берегов. Никакой связи между ними нам обнаружить не удалось.

Для оценки влияния второго фактора мы провели расчет потока волновой энергии, генерируемой ветрами волноопасных румбов, за динамически активный период для каждого года с 1981 по 2003. Подобный расчет, выполненный по методике Попова—Совешаева [2, 3], которая позволяет наиболее точно учитывать конкретные ледовые условия акватории и, соответственно, важнейший параметр — величину разгона волн, от которого в значительной степени зависит суммарный объем энергии волн, проходящих к внешней границе береговой зоны, проведен впервые. Ранее расчеты проводились для оценки среднесезонных волноэнергетических характеристик на основе среднестатистических данных из метеорологических справочников. Мы же использовали данные срочных 3-часовых наблюдений.

Не вдаваясь в подробности, рассмотрим некоторые основные положения указанного метода [2, 3]. Для условий глубокой воды, т.е. когда дно не влияет на развитие волн, расчет секундного потока волновой энергии (на 1 м длины фронта волны за пределами береговой зоны) производится по уравнению, близкому к соответствующему уравнению метода Лонгинова:

$$\mathcal{E}_{0ст} = 3 \times 10^{-6} V_{10}^3 x, \quad (1)$$

где V_{10} — анемометрическая (истинная) скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря, м/с; x — соответствующий фактический или предельный разгон, км; размерность числового коэффициента соответствует размерности ρ/g (ρ — плотность, $т/м^3$), т.е. $тм^3/мс^2$, в соответствии с чем \mathcal{E}_0 имеет размерность $тм/мс$, или $м/с$, как это принято в динамике береговой зоны.

Для мелководного моря аналогичное уравнение имеет вид:

$$\mathcal{E}_{0мелк} = 2 \times 10^{-6} \left(\frac{gH}{V_{10}^2} \right)^{1,4} V_{10}^5, \quad (2)$$

где числовой коэффициент тоже размерный, а размерность \mathcal{E}_0 такая же, как в (1). Уравнение (2) справедливо при выполнении двух условий. Для мелководных бассейнов, к которым может быть отнесено большинство арктических морей, энергия волн определялась с учетом безразмерного соотношения

$\frac{gH}{V_{10}^2}$ между глубиной H по направлению разгона ветра и его скоростью V_{10} (g — ускорение силы тяжести), названного нами кинематическим показателем мелководности. При $\frac{gH}{V_{10}^2} \leq 3$ глубина водоема ограничивает развитие ветровых волн.

Второе условие определяется следующими соображениями: взаимодействие волн с дном начинается при определенной, достаточно большой их величине; чтобы достичь ее, волны должны пробежать некоторый идеальный путь, не ощущая воздействия дна, т.е. развиваясь в условиях глубокого водоема, для которого справедливо уравнение (1). Следовательно, на границе между глубоководной и мелководной зонами должны одновременно выполняться уравнения (1) и (2). Исходя из этого устанавливается соотношение между минимальным разгоном, обеспечивающим начало взаимодействия волн с дном, и глубиной на разгоне:

$$\frac{x_{min}}{H} \geq 6,5 \left(\frac{gH}{V_{10}^2} \right)^{0,4}, \quad (3)$$

где x_{min} выражено в километрах, а H – в метрах.

При $\frac{gH}{V_{10}^2} = 3$ соотношение (3) дает

$$\frac{gx_{min}}{V_{10}^2} \geq 30. \quad (4)$$

Из (4) получаем величину предельного разгона для глубоководного моря, совпадающую с установленной другими методами:

$$x_{пред} = 3V_{10}^2. \quad (5)$$

Для перехода от секундного потока энергии, генерируемого ветром данной скорости данного румба, к волновой энергии ветра данной градации полученная величина \mathcal{E}_0 умножается на продолжительность действия данного ветра (например, за динамически активный период). Затем величины волновой энергии каждой градации скорости ветра суммировались в пределах заданного волноопасного румба, и в результате получались румбовые среднемноголетние величины суммарной энергии волнений за расчетный период – \mathcal{E}_α .

Для определения продолжительности динамически активного периода и длины разгона волн с учетом ледовитости акваторий Печорского и Карского морей были использованы данные по балльности льда с гидрометеорологических станции и сплоченности льдов, доступных с разрешением 1–3 дня на сайте начиная с 1978 г. Университета штата Иллинойс (США) (<http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere>).

Многие исследователи связывают возможный рост волновой энергии с ростом температур воздуха. Поэтому полученные значения волновой энергии были сопоставлены с температурными характеристиками. Для исследуемого района Печорского моря корреляция между этими характеристиками отсутствует, что в целом противоречит сложившемуся мнению.

Сопоставление результатов расчета волновой энергии с данными по отступанию берегов подтвердили наши предположения о главенствующей роли волно-энергетического фактора в динамике берегов баров и кос (рис. 1). Коэффициент корреляции высокий – 0,8, единственная проблема – короткий ряд ежегодных наблюдений за динамикой берегов. В постперестроечный период ежегодные наблюдения здесь не осуществлялись.

Таким образом, на примере Варандейского района Печорского моря нам удалось показать прямую связь динамики берегов баров и кос с волновым фактором и отсутствие связи с термическим.

Второй тип берега – чрезвычайно широко распространенные в Печорско-Карском регионе типичные термоабразионные и так называемые абразионно-термоденудационные берега. На такие берега влияет весь комплекс активных гидрометеорологических факторов, и термических, и волно-энергетических, находящихся в постоянном взаимодействии и взаимосвязи друг и другом. Термические факторы, действующие в основном летом, оказывают определяющее влияние на развитие термоденудационных, разрушающих берег, процессов. Волновой фактор, в свою очередь, удаляет материал, поставляемый с термоденудацией к подножью берегового уступа. Развитие термоденудационных процессов замедляется, если волны не удаляют продукты термоденудации, а волновой фактор не будет столь эффективно разрушать берег, если таковой находится в мерзлом, не подготовленном термоденудацией, состоянии.

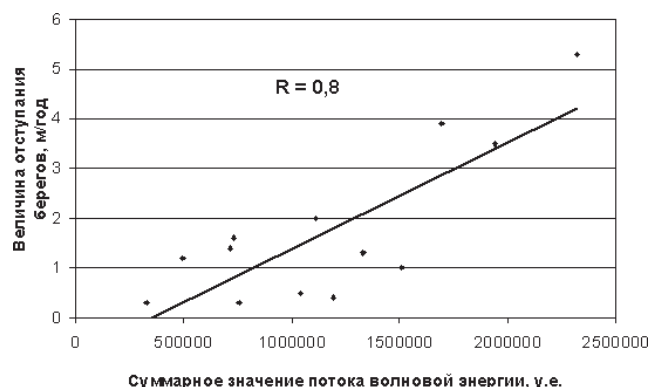


Рис. 1. Связь между динамикой размываемых берегов Печорского моря и волноэнергетическим режимом

В качестве ключевого участка с термоабразионным типом берега мы выбрали район Марре-Сале в Карском море, где, как и на Варандейском участке, имеется ГМС и ведутся наблюдения за динамикой берегов начиная с 1978 г. [5]. Дополнительно были привлечены данные по динамике берегов двух участков Байдарачьей губы Карского моря, где также ведутся стационарные наблюдения. По данным ГМС Марре-Сале была рассчитана сумма среднемесячных температур теплого периода и объем волновой энергии за динамически активный период. Затем полученные результаты были сопоставлены с данными наблюдений за динамикой берегов. Оказалось, что в годы совпадения температурного и волно-энергетического максимумов имеет место увеличение скоростей отступления берегов. И, наоборот, при совпадении температурного и волноэнергетического минимумов – величины отступления берегов оказались минимальными. В остальных случаях, когда, например, отмечается высокий температурный фон и низкая волновая энергия или теплый год, но с низким волно-энергетическим потенциалом, наблюдаются, как правило, промежуточные значения величин отступления берега.

Как и в Печорском море, связь между температурами воздуха и волновой энергией не выявлена. Корреляция суммарной температуры воздуха и волновой энергии с величинами отступления берегов на Марре-Сале и в Байдарачьей губе невелика. Связь между этими показателями в отдельности выявлена, однако коэффициент корреляции с каждым из параметров достаточно низкий – 0,41 и 0,39 соответственно. Для того чтобы определить совместное влияние этих факторов на динамику берегов, мы провели нормализацию рядов по температуре и волновой энергии, а затем нормализованные значения сложили отдельно для каждого года, получив так называемый «термо-волноэнергетический» показатель. Показатель был сопоставлен с результатами наблюдений за динамикой берегов, коэффициент корреляции составил 0,6 (при стабильном вероятностном отклонении), что свидетельствует о высокой степени зависимости величин отступления берегов от суммарного «температурно-волноэнергетического» эффекта (рис. 2).

Таким образом, на примере ключевого участка юго-западной части Карского моря нам удалось показать связь динамики термоабразионных берегов и с температурой, и с волновой энергией.

Основной вывод, следующий из всей выполненной работы в целом: чем выше льдистость мерзлых дисперсных пород, слагающих берега, тем большую роль в их динамике играет термический фактор и, соответственно, чем ниже льдистость пород, тем большее значение в динамике берегов приобретает волно-энергетический фак-



Рис. 2. Связь динамики термоабразионных берегов юго-западной части Карского моря с температурным и волноэнергетическим режимами

тор. Т.е. динамика типичного термоабразионного берега определяется и термическим и волно-энергетическим режимом акватории, их сочетанием и взаимодействием.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Огородов С.А.* Динамика абразионных берегов, сложенных малоальдистыми дисперсными отложениями в глобальных изменениях природной среды и климата // Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геоэкология: Материалы XXI Международной береговой конференции / Под. ред. В.В.Орленка. Калининград: Изд-во КГУ, 2004. С. 51–52.
2. *Попов Б.А., Совершаев В.А.* Методические аспекты ветроэнергетического расчета волновой энергии в мелководных водоемах // Тез. Всесоюзного совещания по динамике берегов. Черкассы, 1979. Кн. 4. С. 73–76.
3. *Попов Б.А., Совершаев В.А.* Некоторые черты динамики арктических берегов Азии // Вопросы географии. Сб. 119. М.: Мысль, 1982. С. 105–116.
4. *Ogorodov S.A.* The Role of Wave Energy in Dynamics of Arctic Coasts Formed by Deposits with Low Ice Content, Arctic Coastal Dynamics. Report of the 5th International Workshop. McGill University, Montreal (Canada) 13–16 October 2004. Edited by V. Rachold et al. Reports on Polar and Marine Research. Bremerhaven, 2005. Vol. 506. С. 82–85.
5. *Vasiliev, A., Kanevskiy, M., Cherkashov, G., and Vanshtein, B.* Coastal Dynamics at the Barents and Kara Sea key sites // Geo-Marine Letters. 2005. Vol. 25. № 2–3. P. 110–120.

S.A. OGORODOV

EFFECTS OF CHANGING CLIMATE AND SEA ICE EXTENT ON EURASIAN ARCTIC COASTAL DYNAMICS

About half of the Eurasian Arctic coastline consists of ice-rich deposits. The dynamic response of this coastal type is forced mainly by thermal and wave-energy mechanisms. The role of the thermal factor increases with ground ice content. Low ice content makes the wave-energy factor more significant. We present a comparison of the changing influence that wave energy and temperature regimes can exert on coastal dynamics for two types of coasts. The first type is represented by barriers and spits, which are expressed by sandy deposits with low ice content. For such coasts, a clear dependence between the seasonal wave energy magnitude directed landward and the coastal retreat rate was found. The second type represents the typical, thermo-erosion bluff coast composed of sandy and clayey deposits with medium ice content. The dynamic regime of this type of coast is determined by both thermal and wave-energy factors.