

## **БЕРЕГОВЫЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ФАКТОР ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ УГЛЕКИСЛО-КАРБОНАТНОГО РАВНОВЕСИЯ В МОРЯХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

**С.О. Разумов, М.Н. Григорьев**

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, razum55@mail.ru*

Климатические изменения, динамика деструктивных береговых процессов и углекисло-карбонатное равновесие в арктических морях Восточной Сибири взаимосвязаны. Развитие береговых криогенных процессов вследствие климатического потепления оказывает дестабилизирующее воздействие на углекисло-карбонатную систему восточных арктических морей, вызывая резкие повышения парциального давления  $\text{CO}_2$  в прибрежных водах до 800–900  $\text{млн}^{-1}$  и его эввазию. Продолжающееся потепление климата и активизация береговых криогенных процессов могут понизить способность восточных арктических морей к инвазии диоксида углерода.

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Арктические моря играют важную роль в регулировании содержания углекислого газа в атмосфере Северного полушария. В летний период они должны являться резервуарами для избыточного атмосферного  $\text{CO}_2$ . Между тем имеются данные [Razumov, 2003; Pipko et al., 2005], которые указывают на пересыщение поверхностных вод углекислым газом и его эввазию (выделение  $\text{CO}_2$  из океанических вод в атмосферу) в ряде районов арктических морей. Потенциальная способность морей к инвазии  $\text{CO}_2$  (поглощение газа океаническими водами из атмосферы) зависит от соотношения компонентов их углекисло-карбонатной системы (углекисло-карбонатного равновесия). Береговые криогенные процессы, активность которых связана в первую очередь с климатическими изменени-

ями, оказывают существенное влияние на формирование углекисло-карбонатного равновесия прибрежно-шельфовых вод.

### **ВОЗДЕЙСТВИЕ БЕРЕГОВЫХ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УГЛЕКИСЛО-КАРБОНАТНОЕ РАВНОВЕСИЕ ПРИБРЕЖНО-ШЕЛЬФОВЫХ ВОД**

Поглощение восточными арктическими морями части атмосферного  $\text{CO}_2$  и увеличение выноса в акватории органических веществ, а также растворенных и твердых карбонатов вызывают изменение углекисло-карбонатного равновесия вод. В морях Восточной Сибири быстро отступающие берега с высоким содержанием грунтового льда являются основными поставщиками терригенного

материала на шельф. В результате разрушения берегов, главным образом процессами термоабразии и термоденудации, в моря Лаптевых и Восточно-Сибирское ежегодно поступает около 4 млн т органического углерода – больше, чем во все остальные моря Арктики [Григорьев и др., 2006]. Часть углекислого газа, поглощенного из атмосферы, а также выделенного при окислении органики, расходуется на растворение карбоната кальция. При этом возрастает щелочность вод. С 1920-х до начала 1950-х гг. она в Восточно-Сибирском море заметно не изменялась. Однако к началу 1990-х гг. щелочность возросла в среднем на 0,21 мг-экв/л, а в южной части акватории – на 0,25–0,40 мг-экв/л. При характерных гидрометеорологических условиях безледного периода с умеренными ветрами и штилями может иметь место как эввазия, так и инвазия  $\text{CO}_2$ . Например, к западу от устья р. Колымы в указанных условиях степень насыщенности карбонатом кальция не превышает 0,77, а парциальное давление  $\text{CO}_2$  в воде изменяется от 89 до 164 млн<sup>-1</sup> [Разумов, 2003]. Оно почти в 2–4 раза ниже, чем в атмосфере высоких широт, поэтому в данных гидрометеорологических условиях наиболее вероятно инвазия углекислого газа. В районе устья р. Колымы парциальное давление  $\text{CO}_2$  в воде достигает 300–600 млн<sup>-1</sup>, по-видимому, в результате интенсивного окисления органического вещества, выносимого рекой. В этом случае создаются условия для эввазии углекислого газа.

Развитие деструктивных береговых криогенных процессов обуславливает значительные колебания физико-химических характеристик и, как следствие, дестабилизацию углекисло-карбонат-

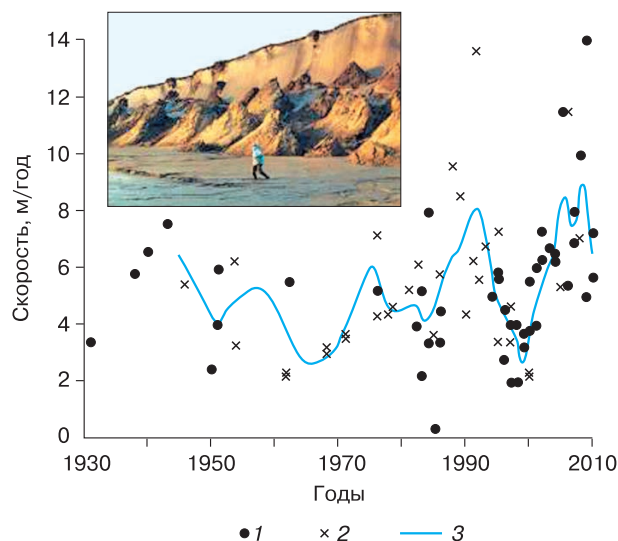


**Рис. 1. Льдистые береговые уступы морей:**

а – о. Большой Ляховский, б – Анабар-Оленекское побережье, в – о. Муостах, з – Быковский п-ов.

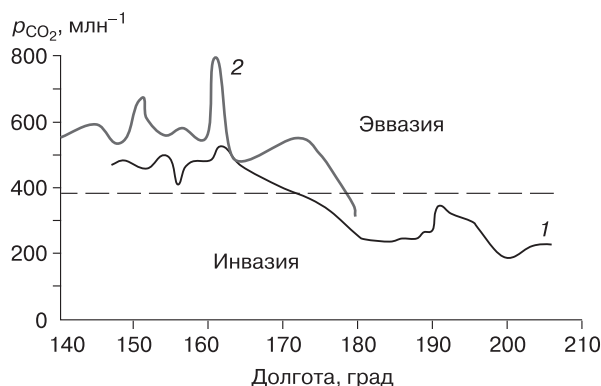
ного равновесия вод прибрежных районов. Темп разрушения льдистых берегов восточных арктических морей существенно изменяется в пространстве и во времени, что связано с вариациями летних температур воздуха, ледовых условий, повторяемости и продолжительности штормов. Относительное похолодание 1950-х–начала 1970-х гг. в Российской Восточной Арктике сопровождалось понижением темпов береговой эрозии. Средняя скорость отступления льдистых берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского на участках с активной термоабразией составляла 2–6 м/год [Арз, 1985]. Эти берега представлены в основном пылеватыми супесями и суглинками с мощными повторно-жильными льдами шириной до 7–8 м. Суммарная объемная льдистость этих пород составляет от 30 до 90 % (рис. 1).

Относительное климатическое потепление в течение последних 40 лет в Восточной Арктике вызвало увеличение продолжительности безледного периода, возрастание площади акваторий, свободных ото льда, а также количества штормов. Средняя летняя температура воздуха превысила климатическую норму на 1,3–1,5 °С. Повторяемость штормов увеличилась на 3–4 %, а суммарная продолжительность воздействия водных масс на береговые уступы возросла в среднем от 58 до 100 ч/год. Средние темпы разрушения льдистых берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского на участках с активной термоабразией возросли до



**Рис. 2. Изменения средней скорости термоабразии льдистых берегов морей Лаптевых (1) и Восточно-Сибирского (2) на активно разрушающихся участках побережья.**

3 – осредненные по двум морям скорости термоабразии. На врезке – типичное береговое обнажение ледового комплекса на п-ове Широкостан.



**Рис. 3.** Парциальное давление диоксида углерода в прибрежно-шельфовых водах морей Восточной Сибири в преобладающих гидрометеорологических условиях безледного периода (1) и в условиях развития термоабразии берегов (2).

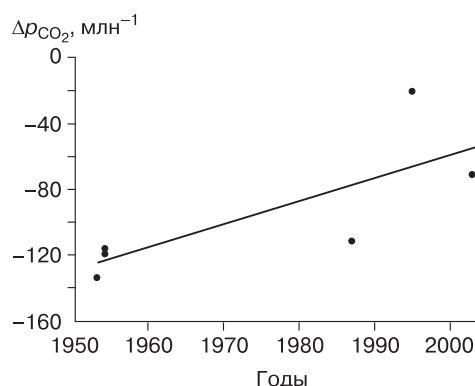
Штриховая прямая – современная концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

4–8 м/год, достигая на отдельных участках побережья 12 м/год (рис. 2). Максимальные скорости термоабразии составляли 17–25 м/год [Разумов, 2000; Grigoriev, Zhang, 2008]. В условиях активного разрушения льдистых берегов окисление выносимых органических веществ вызывает резкое повышение парциального давления углекислого газа в воде до 800–900 млн<sup>-1</sup> и его эввазию (рис. 3) [Razuтов, 2003; Pipko et al., 2005].

Таким образом, в прибрежных районах Восточно-Сибирского моря от Новосибирских о-вов до Чаунской губы в обычных гидрометеорологических условиях имеет место эввазия диоксида углерода, в восточной части моря – инвазия. В условиях развития термоабразии эввазия усиливается и отмечается даже на открытых участках акватории вплоть до пролива Лонга. Вследствие активной термоабразии берегов материка и Новосибирских островов в юго-восточной части моря Лаптевых преобладает эввазия  $\text{CO}_2$ .

### ДЕСТАБИЛИЗАЦИЯ УГЛЕКИСЛО-КАРБОНАТНОГО РАВНОВЕСИЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РЕГИОНАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Климатическое потепление в Арктике приводит к уменьшению абсолютной величины градиента парциального давления  $\text{CO}_2$  между водой и воздухом (рис. 4). Это происходит в связи с активизацией береговых криогенных процессов. Масса выносимого в акваторию органического вещества, законсервированного в вечной мерзлоте, существенно увеличивается. В этих условиях потенциальная способность вод ледовитых морей к инва-

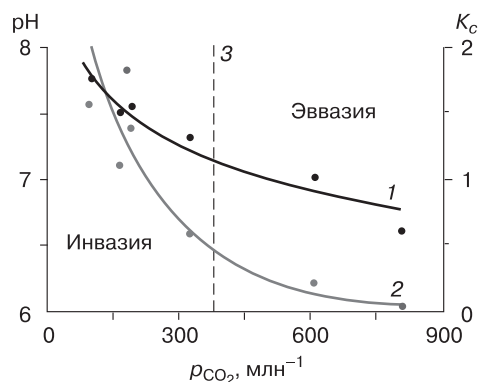


**Рис. 4.** Разность между парциальными давлениями диоксида углерода в водах восточной части Восточно-Сибирского моря и в атмосфере (по данным [Мусина, 1960; Feely et al., 2001; Razuтов, 2003; Pipko et al., 2005]).

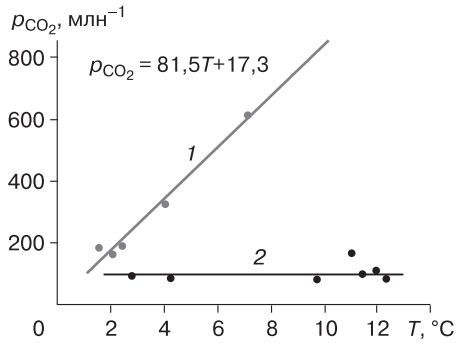
Отрицательный знак градиента указывает на инвазию газа.

зии газа понижается и возрастает вероятность перемены знака градиента парциального давления, т. е. эввазии диоксида углерода (см. рис. 4). Следствием эввазии должно быть понижение парциального давления  $\text{CO}_2$  в воде и относительное повышение степени насыщенности вод карбонатом кальция в результате диссоциации бикарбонатов. При этом система должна вернуться к равновесному состоянию с атмосферным  $\text{CO}_2$  и, возможно, к его инвазии (рис. 5).

Однако этого не происходит вследствие дефицита твердых карбонатов в восточных арктических морях. На их растворение затрачивается относительно малая часть диоксида углерода, который



**Рис. 5.** Связь парциального давления диоксида углерода  $p_{\text{CO}_2}$  в Восточно-Сибирском море с активностью ионов водорода pH (1) и со степенью насыщенности вод карбонатами  $K_c$  (2) при современном парциальном давлении диоксида углерода в атмосфере (3).



**Рис. 6. Связь парциального давления диоксида углерода  $p_{CO_2}$  в морских водах с их температурой  $T$  при солесности воды:**

1 – 20–30 ‰, 2 – 2–13 ‰.

образовался в воде при окислении органики, выносимой в акватории в процессе термоабразии берегов. Большая его часть переходит в газообразное состояние, повышая парциальное давление. Таким образом, в прибрежно-шельфовых водах, прилегающих к участкам активно разрушающихся берегов, состояние углекисло-карбонатной системы является динамически нестабильным.

С повышением температуры воды растворимость диоксида углерода понижается, следовательно, его парциальное давление возрастает, увеличивая вероятность эввазии. В восточных арктических морях упомянутая зависимость справедлива для воды с солесностью более 20 ‰. В водах прибрежно-шельфовых районов с солесностью менее 13 ‰ она четко не проявляется (рис. 6). Это свидетельствует о том, что в прибрежных районах углекисло-карбонатное равновесие вод может смещаться в сторону понижения парциального давления диоксида углерода с повышением степени насыщенности карбонатом кальция и pH (см. рис. 5). Возможная причина таких изменений – расход агрессивной части свободного  $CO_2$  на растворение выносимых с суши твердых карбонатов. Реакция системы на это смещение – инвазия диоксида углерода, несмотря на относительно высокую температуру воды.

Таким образом, дестабилизация углекисло-карбонатной системы арктических морей сопровождается эввазией диоксида углерода, что обуславливает формирование и накопление в воде карбонатов кальция. Инвазия атмосферного диоксида углерода и, как следствие, растворение карбонатов отражает стабильное состояние углекисло-карбонатной системы обоих морей. Изменения климата, динамика деструктивных криогенных процессов и углекисло-карбонатное равновесие в восточных арктических морях взаи-

мосвязаны. Смещения равновесия в углекисло-карбонатной системе усиливают климатические колебания в Арктике, вызванные другими причинами.

Поясним этот тезис. Согласно термодинамической модели сезонной эволюции системы океан–атмосфера [Каган и др., 1986], при удвоении содержания атмосферного  $CO_2$  с 280 до 560 млн<sup>-1</sup> среднегодовая температура приземного слоя атмосферы севернее 60° с.ш. повысится на 1,4 °C (средняя летняя температура повысится на 0,75, зимняя – на 1,7). С начала 1960-х гг. до 2008 г. парциальное давление диоксида углерода в атмосфере Северного полушария возросло на 75 млн<sup>-1</sup>. По результатам термодинамического моделирования, среднегодовая температура воздуха севернее 60° с.ш. должна повыситься на 0,37 °C. Данные наблюдений на 14 метеостанциях от о. Визе до мыса Дежнева показывают, что среднегодовая температура приземного воздуха в указанный интервал времени повысилась на 1,0–2,7 °C, в среднем – на 1,8 °C [Григорьев и др., 2009]. Отсюда следует, что вклад повышения концентрации атмосферного  $CO_2$  в наблюдаемое потепление климата составляет около 20 %.

По-видимому, основное влияние на относительные климатические изменения Северного полушария оказывают другие природные факторы. Предположительно, это периодические космогеофизические воздействия приливного типа с периодами около 20 и 50 лет [Григорьев и др., 2006] и связанные с ними изменения циркуляции вод в Мировом океане и глобальной циркуляции атмосферы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вариации космогеофизических сил инициируют изменения климатических условий в сторону относительного потепления или похолодания. Следствием этого являются изменения активности береговых криогенных процессов. Дестабилизация углекисло-карбонатного равновесия вод не является инициатором климатических изменений, а лишь приводит к увеличению амплитуды их колебаний.

В складывающихся климатических условиях арктические моря в целом сохраняют потенциальную способность к инвазии диоксида углерода, несмотря на интенсивный вынос в акваторию органических веществ и повышение летней температуры воды. Однако дальнейшее климатическое потепление и активизация береговых криогенных процессов могут усилить дестабилизацию карбонатного равновесия морей Восточной Сибири и значительно снизить их способность к инвазии  $CO_2$ .

### Литература

- Арэ Ф.Э.** Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск, Наука, 1985, 172 с.
- Григорьев М.Н., Куницкий В.В., Чжан Р.В., Шепелев В.В.** Об изменении геокриологических, ландшафтных и гидрологических условий в арктической зоне Восточной Сибири в связи с потеплением климата // География и природ. ресурсы, 2009, № 2, с. 5–11.
- Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б.** Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 74–94.
- Каган Б.А., Рябченко В.А., Сафрай А.С.** Реакция системы океан–атмосфера на удвоение содержания атмосферного CO<sub>2</sub> и ее сезонная изменчивость // Океанология, 1986, т. XXVI, № 3, с. 365–375.
- Мусина А.А.** Гидрохимическая характеристика Арктического бассейна // Вопросы гидрохимии Арктического бассейна. Л., АНИИ, 1960, т. 218, с. 5–65.
- Разумов С.О.** Скорость термоабразии морских берегов как функция климатических и морфологических характеристик побережья // Геоморфология, 2000, № 3, с. 88–94.
- Feely R.A., Sabine Ch.L., Takahashi T., Wanninkhof R.** Uptake and storage of Carbon Dioxide in the Ocean: The global CO<sub>2</sub> survey // Oceanography, 2001, vol. 14, No. 4, p. 18–32.
- Grigoriev M., Zhang R.** Drastic change of costal permafrost processes under resent worming within the East Siberian Arctic region // The First Intern. Symp. on the Arctic Research (ISAR-1). Drastic Change under the Global Warming. Miraikan, Tokyo, Japan, 2008, p. 191–194.
- Pipko I.I., Semiletov I.P., Pugach S.P.** Carbonate system dynamics in the East-Siberian region: coastal zone // Rep. of 5th Arctic Coastal Dynamics Intern. Workshop, Montreal, Canada, 2005, p. 89–93.
- Razumov S.O.** Coastal cryogenic processes and carbonate balance of the coastal waters of eastern Arctic seas in the light of a changing climate // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Permafrost. Zurich, Switzerland, 2003, vol. 2, p. 935–939.

*Поступила в редакцию  
21 февраля 2011 г.*