

УДК 551.464.626+465+268.52

**РАЗРУШЕНИЕ МЕРЗЛЫХ ПОРОД ПОБЕРЕЖЬЯ КАК ВАЖНЫЙ  
ФАКТОР В БИОГЕОХИМИИ ШЕЛЬФОВЫХ ВОД АРКТИКИ**

© 1999 г. И.П. Семилетов

*Тихоокеанский океанологический институт**Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток*

Представлено академиком Г.С. Голицыным 28.05.99 г. Поступило 31.05.99 г.

В последнее время выявление роли арктических морей в бюджете атмосферного  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  вызывает все больший интерес. Продуктивность арктических вод Северного Ледовитого океана и окраинных морей, которая ранее недооценивалась, наряду с осенне-зимним охлаждением вод может быть важным фактором в изымании «избытка» атмосферного  $\text{CO}_2$  в северном полушарии [Wheller et al., 1996; Семилетов и др., 1996; 1999]. Оказалось, что открытые акватории арктических морей являются стоком атмосферного  $\text{CO}_2$  даже во время и после осенне-зимней конвекции [Семилетов и др., 1996; 1999; Semiletov et al., 1996; Семилетов, 1995; Semiletov, 1999]. В то же время прибрежные зоны арктических морей, несмотря на их высокую продуктивность, могут быть значительно перенасыщены  $\text{CO}_2$  (и  $\text{CH}_4$ ) по отношению к атмосфере не только в районах вблизи устьев сибирских рек, которые являются круглогодичным источником  $\text{CO}_2$  в атмосферу, но и в удаленных от речного стока районах (Чукотское и Восточно-Сибирское моря) [Семилетов и др., 1996; Semiletov et al., 1996; Семилетов, 1995]. В некоторых прибрежных районах, удаленных от речного стока (восточная часть Восточно-Сибирского моря, западная часть Чукотского моря), величина парциального давления, соответствующего содержанию растворенного  $\text{CO}_2$  в поверхностных водах ( $p\text{CO}_2$ ), превышала 1500 мкатм, в то время как для поверхностных речных вод (Колыма, Лена, Обь, Енисей) характерны величины  $p\text{CO}_2$ , не превышающие 1000 мкатм. Это значит,

что в прибрежной зоне арктических морей «работает» некий, не учитываемый ранее, региональный источник  $\text{CO}_2$ .

Обнаружение неожиданно высоких значений  $p\text{CO}_2$  в прибрежной зоне мелководных арктических морей побудило нас провести дополнительные исследования по выявлению процесса, определяющего формирование обнаруженных аномалий в динамике карбонатной системы. В настоящем сообщении приведены результаты морских исследований, которые демонстрируют влияние разрушения мерзлых пород побережья на биогеохимический режим прибрежной зоны шельфовых морей Арктики.

В августе-сентябре 1997 и 1998 гг. на средства РФФИ была снаряжена небольшая экспедиция ТОИ ДВО РАН в море Лаптевых на борту ГС «Дунай» Тиксинского гидрографического управления, в которой были продолжены гидрохимические исследования в системе река Лена-море Лаптевых, обобщенные в [Semiletov, 1999], а также выполнены целевые комплексные исследования в мелководной (глубины менее 20 м) юго-восточной части моря Лаптевых и проливе Дмитрия Лаптева (Восточно-Сибирское море). В общей сложности было выполнено 57 океанологических станций (глубины от 1.7 до 20 м) с отбором проб воды батометром Нискина от поверхности до дна и поверхностных осадков - дночерпателем ДЧ-0.025 м<sup>2</sup>. На борту проводились измерения pH (в шкалах NBS и SWS в термостатируемой ячейке при 25 °C) общего минерального углерода в форме

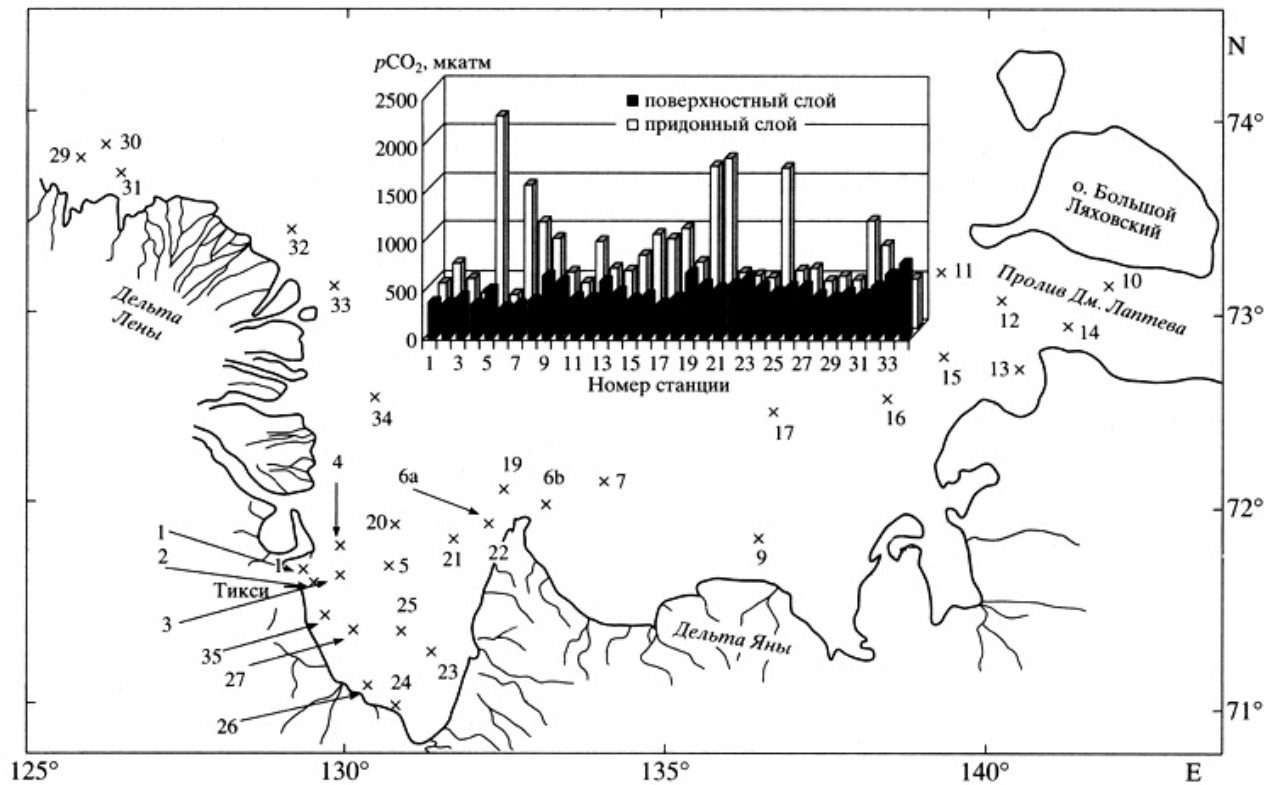
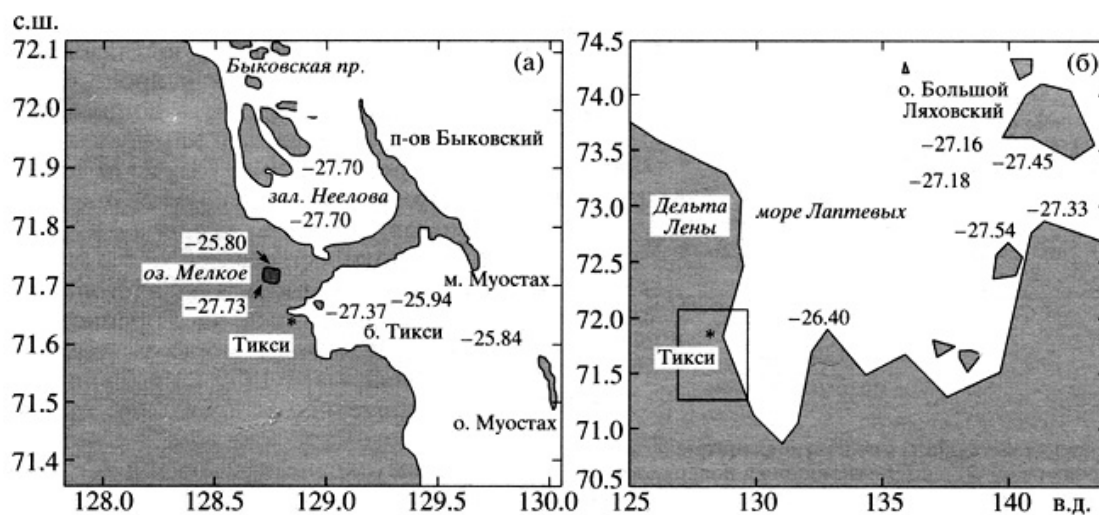


Рис. 1. Распределение  $p\text{CO}_2$  в поверхностном и придонном слое прибрежной зоны моря Лаптевых и пролива Дмитрия Лаптева.

$\text{CO}_2$  ( $T\text{CO}_2$ ) паро-фазным динамическим газохроматографическим методом с конверсией  $\text{CO}_2$  в форму  $\text{CH}_4$  и анализом на пламенно-ионизационном детекторе, растворенного  $\text{CH}_4$ -методом парофазного статического газохроматографического анализа [Семилетов и др., 1996; Semiletov, 1999], общей щелочности (ТА). Величина  $p\text{CO}_2$  рассчитывалась на основе измеренных величин  $\text{pH}-T\text{CO}_2$ ,  $\text{pH}-\text{TA}$ ,  $T$ ,  $\text{Cl}$  (S), ‰, и принятых в международной практике систем констант ионизации угольной и борной кислот [Семилетов и др., 1996; 1999]. В лабораторных условиях (ТУГМС) определялось содержание валового азота (N) и фосфора (P), хлорность (Cl, ‰). В донных отложениях определяли изотопный состав органического углерода осадков,  $\delta^{13}\text{C}$  (В. Киселев, Институт геологии ДВО РАН), содержание органического углерода и мольное C/N отношение (проф. М. Фукуда, Университет Хоккайдо).

На рис. 1 приведены величины  $p\text{CO}_2$  в поверхностном и придонном слое прибрежной зоны моря Лаптевых и пролива Дмитрия Лаптева (отсутствие величины  $p\text{CO}_2$  на рис. 1 в придонном слое

означает, что при глубине места  $< 3$  м отбиралась только одна поверхностная проба). Оказалось, что несмотря на небольшие глубины величина  $p\text{CO}_2$  в придонном слое, как правило, в 2-4 раза выше, чем на поверхности. Аномально высокие значения  $p\text{CO}_2$  ( $> 1500$  мкатм) были обнаружены вблизи быстро разрушающихся береговых ледовых комплексов острова Муостах и неподалеку от мыса Буор-Хая. По имеющимся сведениям средняя скорость разрушения о-ва Муостах составляет 6-12 м/год (М.Н. Григорьев, ИМЗ СО РАН, личное сообщение, 1998 г.), а скорость разрушения северо-восточного клифа залива Буор-Хая достигает первых десятков метров только за летний сезон (данные НПО «Бизон», 1998 г.). Это значит, что в наше время огромное количество органического вещества, законсервированного в холодные эпохи в верхнем слое мерзлоты, переносится в море, где вовлекается в современный биогеохимический цикл. Для иллюстрации значимости «мерзлотного» запаса органического вещества можно сказать, что только поверхностный слой мерзлоты содержит  $\sim 450$  Гт ( $1 \text{ Гт} = 10^9 \text{ т}$ )



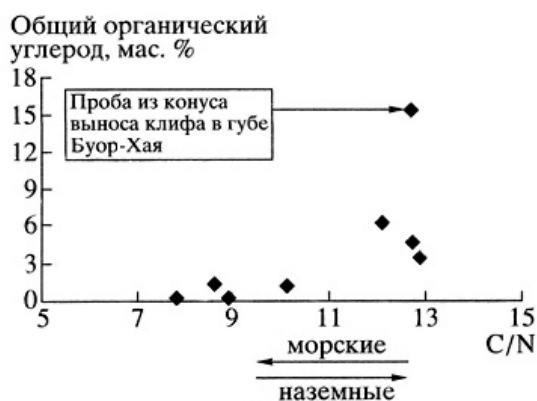
**Рис. 2.** Распределение  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  в поверхностном слое донных отложений юго-восточной части моря Лаптевых и проливе Дмитрия Лаптева (Восточно-Сибирское море): а – придельтовый район (врезка), б – общая схема.

органического углерода, что соизмеримо с запасом общего растворенного углерода, содержащегося в Северном Ледовитом океане (СЛО) [Semiletov, 1999].

Это предположение подтверждается распределением  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  в поверхностном слое донных отложений юго-восточной части моря Лаптевых и пролива Дмитрия Лаптева (рис. 2). Донные осадки арктического шельфа формируются под воздействием трех основных источников органического углерода: с одной стороны, это терригенный органический углерод, поступающий с речным стоком (1) и/или благодаря разрушению берегов (2); с другой стороны, это органическое вещество морского происхождения (3). Органическое вещество «типичных» морских отложений высоких и умеренных широт в большей степени обогащено тяжелым изотопом углерода (от -13‰ до -24‰) по сравнению с наземным углеродом (от -25‰ до -30‰) [Naidu et al., 1993; Киселев и др., 1998]. В исследованных образцах  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  изменяется от -25.84‰ до -27.82‰. В качестве «местного эталона терригенного органического углерода» можно рассматривать отложения озера Мелкое вблизи Тикси, где величина  $\delta^{13}\text{C}$  изменялась в пределах от -27.73‰ до -27.80‰, и донные отложения залива Неелова - части эстуария реки Лены, где  $\delta^{13}\text{C}$  имела близкое значение (-27.70‰; рис. 2 б). Наиболее низкие («морские») значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  (-25.84...-25.94‰) были

обнаружены между о. Муостах и мысом Муостах, где по данным ТУГМС (А.Ю. Гуков, личное сообщение) в осенне-зимний сезон возможно частичное проникновение вод из Арктического бассейна, где доминируют воды Северо-Атлантического происхождения. Наши данные по распределению  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  в донных отложениях свидетельствуют о доминировании органического углерода наземного происхождения. Важно то, что в удаленном от речного стока районе вблизи и в проливе Дмитрия Лаптева, где высоки скорости разрушения берегов (согласно лоции Восточно-Сибирского моря ~10 м/год в последние десятилетия), были обнаружены значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}} = -27.16...-27.45\%$ , т.е. величины, типичные для наземных экосистем. Отметим, что «наземный» сигнал на шельфе Чукотского моря [Naidu et al., 1993] выражен не так явно ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}} = -22...-25\%$ ), как в нашем районе исследований, что объясняется разницей в интенсивности разрушения берегов: в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском этот фактор более значим, что обусловлено более высоким клифом и наличием быстро разрушающегося ледового комплекса, обогащенного органическим веществом (содержание в среднем 15-17%).

Другим геохимическим индикатором, подтверждающим правильность нашей гипотезы о важной роли разрушения берегов арктических морей в биогеохимии



**Рис. 3.** Зависимость общего содержания органического углерода (мас. %) и C/N-отношения в поверхностных образцах донных отложений моря Лаптевых.

арктических морей, являются результаты измерения содержания органического вещества и C/N-отношения в донных отложениях (рис. 3). Известно, что средние значения отношения C/N, типичного для морского и наземного органического вещества, составляют 6 и 15 соответственно [Stein & Nurnberg, 1995]. Согласно результатам наших измерений для ледового комплекса побережья моря Лаптевых типична величина C/N около 15 с содержанием органического вещества ~15.5-16.9%. Из рис. 3 следует, что значения C/N в образцах донных отложений, отобранных в море, также демонстрируют наличие «наземного» сигнала. Интересно, что наиболее низкие значения C/N-отношения (7.8-8.9) были обнаружены вблизи мыса Быковский и на перекате Дашка (песчаный грунт), т.е. в эстуарии реки Лены, где наземное органическое вещество уже трансформировалось в результате деятельности пресноводной биоты и русловых процессов. В этих же образцах содержание органического вещества изменялось в пределах 0.2-0.3%.

Вероятно, низкое содержание органического вещества в эстуарии обусловлено относительно высокими скоростями выноса речных вод и «вымывания» взвешенного органического вещества в море: по данным, приведенным в [Stein & Nurnberg, 1995], содержание органического вещества в донных отложениях, ассоциируемых со шлейфом выноса его водами реки Лены, более

высокое, чем в эстуарии, и обычно изменяется в пределах 1-2 мас. %.

Результаты, представленные на рис. 2, 3, свидетельствуют, что по крайней мере в прибрежной зоне поступление органического вещества в донные отложения шельфа благодаря разрушению берегов доминирует над выносом его с речным стоком. Отметим, что в данном случае не рассматривается транспорт растворенного органического вещества, а рассматривается перенос его в системе суша-шельф только в твердой фазе. Основываясь на наших предварительных результатах, можно считать, что органическое вещество, поступающее в высоких концентрациях на шельф вследствие разрушения берегов, окисляется психрофильной биотой и вовлекается в биогеохимические процессы на шельфе. Насколько далеко прослеживается «наземный сигнал» в трофической цепи арктических морей, предстоит выяснить. Однако, основываясь на последних деталях исследованиях, выполненных по программе NEW Polynya Program на северо-восточном шельфе Гренландии, которые свидетельствуют о непонятной природе аномально высоких для морских экосистем отношений C/N [Daly et al., 1999], можно говорить о возможности влияния разрушения берегов и транспорта наземного органического вещества, вовлеченного в современный биогеохимический цикл, на функционирование экосистемы Северного Ледовитого океана в целом. Аномально высокие значения биомассы бентоса (до 240 г/м<sup>2</sup>) [Гуков, 1998] в губе Буор-Хая (море Лаптевых), где высоки скорости разрушения берегов, также могут быть ассоциированы с этим источником органического вещества.

В заключение уместно привести результаты оценки транспорта наземного вещества (в твердой фазе) благодаря речному стоку [Rachold et al., 1996] и разрушению (термоэрозии и термоденудации) южного побережья СЛО в секторе Республики Якутия-Саха (от Таймыра до устья Колымы; М.Н. Григорьев, устное сообщение, 1996 г.).



Оказывается, ежегодный транспорт твердого вещества реками Якутии (Лена, Яна, Индигирка, Колыма) примерно равен массе вещества, поступающего благодаря разрушению берегов (~45 Гт). Однако менее 15% от речного транспорта вещества (измеренного и вычисленного на створах в нижнем течении рек) достигает морского шельфа, так как 85-90% твердого стока оседает в зоне смешения река-море [Rachold et al., 1996], в то время как наземный береговой материал, обогащенный органикой, практически полностью переносится из волно-прибойной зоны на шельф [Арэ, 1985].

Таким образом, прямые приближенные оценки дают основание предполагать, что разрушение мерзлых пород арктического побережья может играть более важную роль в снабжении арктических морей органическим веществом по сравнению с речным транспортом. Действительно, даже сильно приближенная оценка общего количества органического вещества, поступающего только на арктический шельф Якутии вследствие эрозии берегов, ежегодно составляет примерно 5 Мт органического углерода (принимая «среднее» содержание  $C_{орг}$  в береговой мерзлоте 10 мас. %), что соизмеримо с общим количеством растворенного  $C_{орг}$  (0.008 Гт), поставляемым с речным стоком в арктические моря [Gordeev et al., 1996]. Также возможно, что часть  $C_{орг}$  древнего

наземного происхождения (поздний плейстоцен-голоцен), обедненного изотопом  $^{14}C$ , возвращается в атмосферу в форме  $CO_2$  и  $CH_4$  после многих тысяч лет хранения в «кладовой» мерзлоты арктического побережья в процессе деструкции органического вещества в донных отложениях. Возможно, этот фактор наряду с эмиссией древнего углерода в форме  $CH_4$  из подозерных таликов [Zimov et al., 1997] может быть использован для объяснения «излишков» древнего углерода  $C-CO_2$ , обедненного  $^{14}C$ , в атмосфере.

Некоторые результаты настоящего исследования докладывались на Гордоновской конференции по полярным морским наукам (Вентура, Калифорния, март 1999 г.) и были рассмотрены как приоритетное направление при планировании биогеохимических исследований в Северном Ледовитом океане под эгидой Международного арктического научного центра (МАНЦ) в г. Фэрбанкс, Аляска (28-30 марта 1999 г.).

Работа выполнена при поддержке РФФИ по грантам 96-05-66350, 99-05-65066, 99-05-65453 и ФЦП «Интеграция высшей школы и Российской Академии наук» (проект 726) при участии и поддержке Объединенного института арктических исследований (Cooperative Institute for Arctic Research) и МАНЦ в г. Фэрбанкс, Аляска.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. М.: Наука, 1985. 172 с.
2. Гуков А.Ю. Особенности распределения трофических группировок бентоса в море Лаптевых // Океанология. 1998. Т. 38. № 5. С. 734-741.
3. Киселев И.И., Семилетов И.П., Пупко И.И. и др. В кн.: Климатическая изменчивость в системе атмосфера-суша-море в Американо-Азиатском секторе Арктики. Тр. Арктического регионального центра. Владивосток, 1998. Т. 1. С. 121-126.
4. Семилетов И.П. В кн.: Химия морей и океанов. М.: Наука, 1995. С. 130-154.
5. Семилетов И.П., Пивоваров Н.Я., Пупко И.И., Гуков А.Ю., Волкова Т.И., и др. О динамике растворенных  $CH_4$  и  $CO_2$  в дельте р. Лены и море Лаптевых // ДАН. 1996. Т. 350. № 3. С. 406-409.
6. Семилетов И.П., Тищенко П.Я., Христенсен Дж.П., Пупко И.И., Пугач С.П. О карбонатной системе Чукотского моря // ДАН. 1999. Т. 364. № 3. С. 382-386.
7. Daly K.L., Wallace D.W.R., Smith W.O. et al. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № C2. P. 3185-3199.
8. Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S. et al. // Amer. J. Sci. 1996. V. 296. P. 664-691.
9. Naidu A.S., Scalan R.S., Feder H.M. et al. // Contin. Shelf Res. 1993. V. 13. № 5/6. P. 669-691.
10. Rachold V., Alabyan A., Hubberten H.W. et al. // Polar Res. 1996. V. 15. № 2. P. 183-196.

11. Semiletov I.P., Pipko I.I., Pivovarov N.Ya. et al. // Atmos. Environ. 1996. V. 30. № 10/11. P. 1657-1671.

12. Semiletov I.P. // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. № 2. P. 286-306.

13. Stein R., Nurnberg D. In: Reports on Polar Research. Bremerhaven: AWI, 1995. V. 176. P. 286-296.

14. Wheller P.A., Gosselin M., Sherr E. et al. // Nature. 1996. V. 380. P. 697-699.

15. Zimov S.A., Voropaev Yu.V., Semiletov I.P. et al. // Science. 1997. V. 277. P. 800-802.

**Ссылка на статью:**



**Семилетов И.П. Разрушение мерзлых пород побережья как важный фактор в биогеохимии шельфовых вод Арктики. ДАН, 1999, том 368, № 5, с. 679-682.**