

АРКТИКА и АНТАРКТИКА

Выпуск 4 (38)



МОСКВА НАУКА 2005

И.А. Мельников

**ХИМИЧЕСКИЙ И БИОЛОГИЧЕСКИЙ
СОСТАВ МОРСКИХ ПРИПАЙНЫХ ЛЬДОВ
И ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОДЫ МОРЯ ДЕЙВИСА
(АНТАРКТИКА)**

В настоящее время в экологии Южного океана накопилось множество актуальных проблем, для понимания и решения которых необходимо на междисциплинарном уровне получение новых достоверных данных из зоны морских льдов Антарктики. Наши знания о процессах в Южном океане основаны главным образом на наблюдениях в летний период, когда более 80% ледового покрова разрушается, поэтому выявляемая динамика продукционных характеристик морской экосистемы неполно отражает ее состояние в остальное время года, когда Южный океан покрывается устойчивым ледовым покровом, сохраняющимся в течение восьми месяцев. Наблюдения в западной части моря Уэдделла показали, что в зимний период трофические потребности биологических сообществ, обитающих у морского льда, поддерживаются не за счет фитопланктона, а за счет органической продукции ледовых водорослей [Melnikov, 1998].

Для изучения экологии зоны морских антарктических льдов в первую очередь следует выявить ту биологическую информацию, которую будет можно использовать в моделях, описывающих функционирование экосистемы морских льдов Южного океана. Это необходимо прежде всего для организации научных исследований в период проведения Международного Полярного Года (МПГ) в 2007–2008 гг.

В предлагаемой статье материал рассматривается с точки зрения использования его в качестве “базового” варианта для последующего сравнения с аналогичными материалами экологического мониторинга морского льда и контактирующих с ним поверхностных вод, которые предполагается получить в период проведения МПГ. Кроме того, четко определяется место проведения экологического мониторинга – окрестности континентальной станции Мирный, где орография берегов, наличие длинного пологого шельфа, а также мелких островов создают условия для продолжительного существования припайного морского льда, что позволяет организовать долгопериодные наблюдения за развитием биологических сообществ морского льда. Таким “базовым” вариантом, вероятно, можно считать материалы, полученные в 38-й экспедиции РАЭ (1993 г.), когда впервые удалось провести комплексные гидрохимические и гидробиологические исследования в окрестностях станции Мирный, результаты которых представлены в статье.

Материал и методики

В январе-феврале 1993 г. в районе обсерватории Мирный (93°01' з.д., 66°33' ю.ш.) были проведены комплексные биогидрохимические исследования морских припайных льдов и поверхностной морской воды. В это время световой день продолжался до 24 ч в сутки, температура воздуха колебалась в пределах 0–5° С, а температура поверхностной морской воды была близка к 0 °С, что оптимально для развития подледного фитопланктона и ледовых микроорганизмов. В этот период таяние льда проходило особенно активно.

Отбор ледовых кернов проводили в 50 м к северо-востоку от мыса Мабус на двух полигонах (А1 и А2), которые были расположены на однолетнем зимнем припае на расстоянии около 1 км один от другого. Керны отбирали с 15 по 21 января из расчета одно наблюдение за 3–5 дней в зависимости от погодных условий. Ледовые керны отбирали кольцевым буром диаметром 90 мм от верхней (снежной) до нижней (морской) поверхности. Непосредственно на месте отбора измеряли толщину льда и температуру с дискретностью 20 см. После этого керн помещали в полиэтиленовый контейнер для исключения возможных загрязнений, а затем в специальный светонепроницаемый тубус для приостановки процессов фотосинтеза ледовой флоры. В лаборатории ледокола керн делили на кратные части по 20 см каждая, расфасовывали в химически чистую полиэтиленовую посуду и затем растапливали в темноте при температуре 20–25 °С в течение 3–8 ч. Исходный объем проб растопленного льда составлял 1,3–1,5 л. Все последующие работы велись с талой водой.

Пробы морской поверхностной воды отбирали полиэтиленовым ведром из приливной трещины, а после выноса припая непосредственно с берега. Объем отбираемой пробы составлял 10 л. Сразу после отбора измеряли температуру воды. После этого воду транспортировали в лабораторию в двух полиэтиленовых канистрах.

В талой (ледовой) и поверхностной морской воде измеряли следующие параметры: 1) соленость по электропроводности на солемере "AUTOSAL" в судовой лаборатории НЭС "Академик Федоров"; 2) концентрацию растворенного неорганического фосфора и кремния по методике Морфи–Райли [Современные методы, 1991]; 3) концентрацию хлорофилла *a* по методике [SCOR- UNESCO, 1966].

Для выделения клеток на предмет изучения видового состава ледовой флоры и фитопланктона использовали метод обратной фильтрации. Для этого ледовую талую воду объемом 1 л, а морскую воду объемом 8 л пропускали через фильтр с размером пор 0,2 мкм. Объем камеры под фильтром на установке обратной фильтрации, где концентрировалась взвесь, был равен 50 мл, что давало возможность концентрировать содержимое пробы талой воды льда в 20 раз, а морской воды в 160 раз. Полученные концентраты фиксировали формалином так, чтобы его концентрация в пробе составляла 2%. В стационарных условиях лаборатории фиксированные пробы просматривали в счетной камере объемом 0,09 мл (дважды) под световым микроскопом при увеличении 360. Учитывались клетки с размером >15 мкм.

Результаты

Морской лед. Толщина льда на полигоне А1 уменьшилась от первоначальной (110 см) до 85 см, а на полигоне А2 от 93 до 74 см соответственно, т.е. в первом случае за шесть дней стаяло 25 см, а во втором – 19 см льда.

На рис. 1 показано распределение температуры и солености в толще морского льда на полигоне А1, величин концентрации минеральных форм фосфора и кремния, а также концентрации хлорофилла *a* в пробах А1С1–А1С4. В этот период температура льда по всему профилю была достаточно высокой, от –1,5 до 0,5 °С. Соленость в середине января находилась на уровне 2‰, а перед выносом припая (конец января) повысилась до 3‰. Концентрация фосфатов в середине месяца варьировала в пределах 0,4–0,7 мкг-ат/л. По мере таяния льда концентрация фосфатов

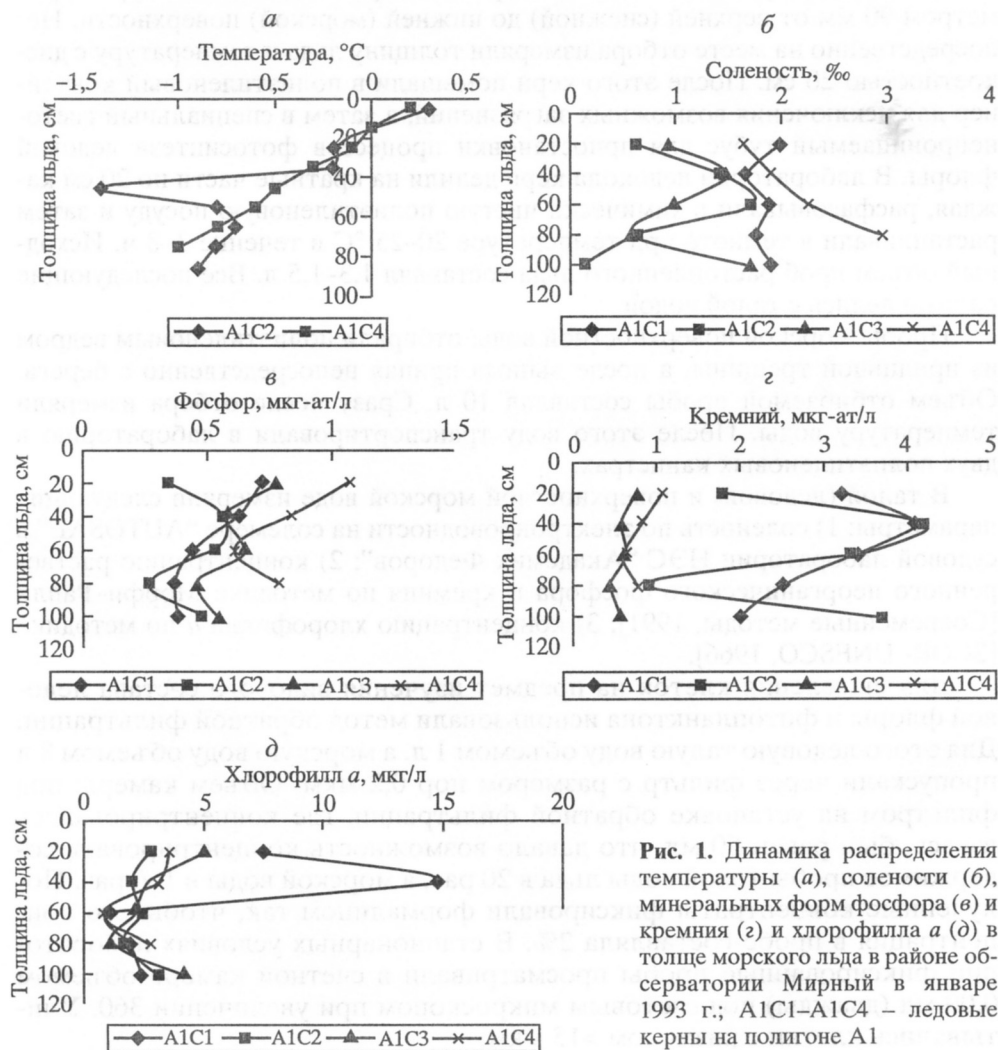


Рис. 1. Динамика распределения температуры (а), солености (б), минеральных форм фосфора (в) и кремния (г) и хлорофилла *a* (д) в толще морского льда в районе обсерватории Мирный в январе 1993 г.; А1С1–А1С4 – ледовые керны на полигоне А1

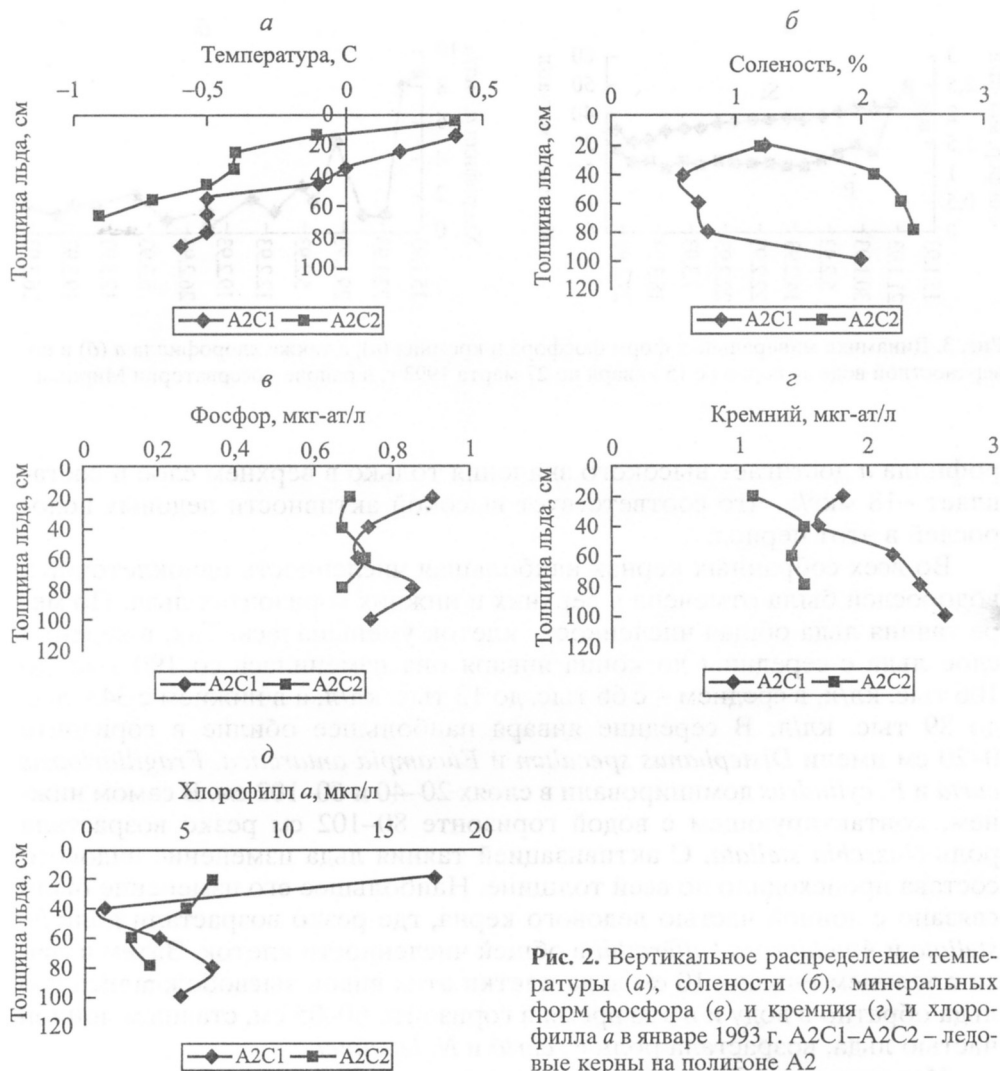


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры (а), солености (б), минеральных форм фосфора (в) и кремния (г) и хлорофилла а в январе 1993 г. А2С1–А2С2 – ледовые керны на полигоне А2

увеличивалась и к концу месяца достигла 1,1 мкг-ат/л. Обратную динамику показывает концентрация растворенной кремниевой кислоты. Так, с середины января и до конца месяца содержание кремния уменьшилось с 4,26 до 0,5–1,2 мкг-ат/л. Максимальная концентрация хлорофилла а наблюдалась в верхних и нижних горизонтах морского льда. В середине месяца содержание хлорофилла а в верхнем слое достигало значений 15 мкг/л, но в процессе таяния льда его концентрация уменьшилась по всей толщине льда до 3–5 мкг/л.

На рис. 2 представлены те же характеристики, что и на рис. 1, но для полигона А2. В пробах льда на полигоне А2 наблюдается аналогичная тенденция к прогреву верхних слоев и их распреснению, как и в толще морского льда на полигоне А1. Концентрации минеральных форм фосфора и кремния также распределяются аналогично. Концентрация хло-

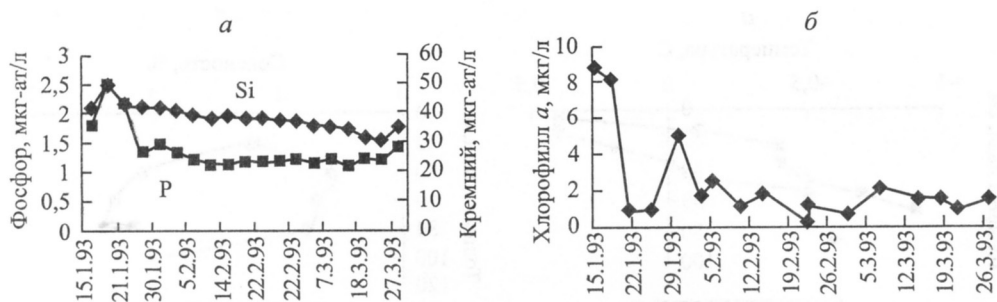


Рис. 3. Динамика минеральных форм фосфора и кремния (а), а также хлорофилла а (б) в поверхностной воде за период с 15 января по 27 марта 1993 г. в районе обсерватории Мирный

рофилла *a* достигает высокого значения только в верхнем слое и составляет ~18 мкг/л, что соответствует высокой активности ледовых водорослей в этот период.

Во всех собранных кернах наибольшая численность одноклеточных водорослей была отмечена в верхних и нижних горизонтах льда. По мере таяния льда общая численность клеток уменьшалась. Так, в верхнем слое льда с середины до конца января она изменилась со 190 тыс. до 106 тыс. кл/л, в среднем – с 66 тыс. до 13 тыс. кл/л, а в нижнем с 343 тыс. до 89 тыс. кл/л. В середине января наибольшее обилие в горизонте 0–20 см имели *Distephanus speculum* и *Eucampia antarctica*. *Fragillariopsis curta* и *F. cylindrus* доминировали в слоях 20–40 и 60–102 см. В самом нижнем, контактирующем с водой горизонте 80–102 см резко возрастала роль *Nitzschia stellata*. С активизацией таяния льда изменение видового состава происходило по всей толщине. Наибольшее его изменение было связано с донной частью ледового керна, где резко возрастали доли *N. stellata* и *Amphiprora kufferathii* в общей численности клеток. Затем в связи с таянием нижних 10 см льда клетки этих видов высвобождались из льда обратно в воду и в это время в горизонте 60–85 см, ставшем донной частью льда, возрастала роль *F. curta* и *N. lecointei*.

Морская вода. Температура поверхностной морской воды снизилась с 0,6 °C в середине января до –0,2 °C в конце месяца. Вследствие таяния льда в этот период образовавшаяся талая вода постепенно стекала под лед, что стало причиной распреснения поверхностной подледной воды до 27–31‰. После разрушения и выноса припая (в ночь с 23 на 24 января) соленость поверхностной воды повысилась до 33,6‰.

Концентрация фосфатов в поверхностной воде в январе составляла 1,29–2,49 мкг-ат/л, а после выноса припая снизились до 1,12–1,33 мкг-ат/л. Аналогичная динамика была отмечена и в отношении содержания растворенной кремнекислоты: в январе концентрация кремния в поверхностной воде держались на уровне 41,6–50,0 мкг-ат/л, а в феврале она изменялась в пределах 37,1–40,8 мкг-ат/л (рис. 3, а).

Концентрация хлорофилла *a* в поверхностной морской воде в середине января составляла 1,1 мкг/л и была значительно (иногда на порядок) ниже, чем во льду (рис. 3, б). После выноса припая содержание хлоро-

филла *a* в воде увеличилось до 1,3–2,7 мкг/л. Общая численность клеток водорослей в воде под льдом варьировала от 3 до 4 тыс. кл/л. Сразу после выноса припая их численность заметно снизилась до 300 кл/л, но через три дня возросла до 2 тыс. кл/л. Наиболее массовыми видами в этот период были *F. sublineata* и *F. cylindrus* – до 75% от суммарного количества клеток.

Обсуждение результатов

Проведенные наблюдения носили мелкомасштабный характер, поскольку велись в пределах одного ледового поля на однолетнем зимнем припае. Время наблюдений совпало с антарктическим летом, когда фотосинтетические процессы протекают наиболее активно, а затем постепенно затухают. В январе шел процесс интенсивного таяния припая, о чем свидетельствуют резкое уменьшение его толщины от 102 до 85 см, а также высокая температура воды в приледовом слое (около 0 °С) и низкие значения солености (27–31‰).

Наблюдаемое различие в вертикальном распределении видов водорослей по толщине однолетнего льда можно объяснить следующими причинами: 1) различным временем образования ледовых слоев в период роста льда; 2) дифференцированным ростом клеток вдоль физико-химического градиента во льду; 3) миграцией клеток с рассоловыми ячейками по каналам стока рассола. По мере таяния льда изменение видового состава происходило в каждом его слое. Подобная динамика, вероятно, связана с усилением гравитационного стока, который выводит клетки с рассолом в морскую воду. Об этом также свидетельствуют уменьшение общей численности организмов в жидкой фазе льда в процессе его таяния и снижение концентрации хлорофилла *a* в верхнем и среднем слоях толщи льда. Одновременно колониальные прикрепляющиеся виды водорослей *N. stellata* и *Amphiprora kufferathii* развиваются на нижней поверхности льда.

Во всех ярусах наибольшая численность клеток и концентрация хлорофилла *a* были отмечены для верхнего (0–40 см) и нижнего (60–102 см) слоев льда. Сообщество верхнего горизонта можно определить как поверхностное (инфильтрационное), а нижнего горизонта – как донное [Lizotte, Sullivan, 1991]. Необходимым условием образования инфильтрационного сообщества на границе раздела снег–лед является затопление льда ниже уровня моря вследствие снеговой нагрузки [Буйницкий, 1973]. В этом сообществе доминировали *F. cylindrus*, *F. curta*, *E. antarctica* и *D. speculum*. В донном сообществе большую роль играли прикрепляющиеся виды водорослей *N. stellata*, *A. kufferathii*, а также *F. cylindrus*, *F. curta* и *N. lecontei*.

Содержание хлорофилла *a* в поверхностной морской воде было ниже, чем во льду (иногда на порядок), а концентрации биогенов значительно выше. После выноса припая концентрация фосфатов и содержание растворенной кремнекислоты в поверхностной морской воде заметно снизились. В то же время произошло увеличение концентрации хло-

рофилла и общей численности клеток. Наблюдаемую динамику можно объяснить следующим образом. Морской лед лимитирует освещенность в подстилающей водной толще [Grossi, Sullivan, 1985]. Развивающаяся во льду флора, действуя как фильтр, также уменьшает фотосинтетически активную радиацию (ФАР), которая может быть использована фитопланктоном [Palmisano et al., 1987]. Так, во время цветения ледовых водорослей излучение подо льдом составляет 0,01–1% от падающей поверхностной радиации [Palmisano, Sullivan, 1985; Smith, Nelson, 1986]. Пока на исследуемой акватории стоит припайный лед, процессы фотосинтеза в поверхностной морской воде протекают медленно в связи с недостатком ФАР, но при достаточном количестве биогенов. После выноса припая освещенность на поверхности резко увеличивается и вызывает интенсификацию фотосинтетических процессов. Кроме того, таяние льда сопровождается переходом водорослей из льда в поверхностную морскую воду, где они продолжают развиваться в составе фитопланктонных сообществ.

Заключение

Современные изменения окружающей среды в полярных областях наиболее заметны в Северном Ледовитом океане, где наблюдается сокращение площади и толщины ледового покрова и как следствие распреснение и потепление поверхностных вод. Наши знания об изменениях в Южном океане до настоящего времени еще недостаточно подкреплены наблюдениями (как в пелагиали, так и в прибрежной зоне), чтобы на основе собранных материалов можно было судить об изменениях морской экосистемы Антарктики. Отсюда следует, что очень важно обратиться к историческим материалам, которые могут быть “базовыми” для оценки состояния морских экологических систем на современном уровне антропогенного воздействия, например, вылова криля и мезопелагических рыб в Южном океане. Представленные в статье материалы являются, на мой взгляд, таким примером, когда данные о химическом и биологическом составе ледово-водной среды в прибрежной зоне у континентальной станции Мирный могут быть основой для сравнения с аналогичными данными, которые предполагается получить во время проведения экологического мониторинга в этом районе в период проведения МПГ в 2007–2008 гг.

Автор выражает благодарность В.В. Тютереву, собравшему полевые материалы и определившему гидрохимические параметры в РАЭ-38, а также Н.А. Менжинской, выполнившей таксономический анализ ледовых и водных проб.

Работа выполнена в рамках проекта № 12 (Госконтракт № 12-03-А “Криаль”) подпрограммы “Изучение и исследование Антарктики” программы ФЦП “Мировой океан”.

Литература

- Буйницкий В.Х. Морские льды и айсберги Антарктики. Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. 255 с.
- Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИО РАН, 1991. 120 с.
- Grossi S.M., Sullivan C.W. Sea ice biological communities. V. The vertical zonation of diatoms in an Antarctic fast ice community // J. Phycol. 1985. Vol. 21. P. 401–409.
- Lissote M.P., Sullivan C.W. Photosynthesis- irradiance relationships in microalgae associated with Antarctic pack ice: evidence for *in situ* activity // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1991. Vol. 71. P. 175–184.
- Melnikov I.A. Winter production of sea ice algae in the western Weddell Sea // J. Mar. Systems. 1998. Vol. 17, N 1–4. P. 195–206.
- Palmisano A.C., Sullivan C.W. Growth, metabolism and dark survival in sea ice microalgae // Sea ice biota / Ed. R.A. Horner. Florida, CRC Press BocaRaton. 1985. P. 131–146.
- Palmisano A.C., Soo Hoo J.B., Moe R., Sullivan C.W. Sea ice microbial communities. VII. Changes in under-ice spectral irradiance during the development of Antarctic sea ice microalgal communities // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1987. Vol. 35. P. 165–173.
- SCOR-UNESCO. Monographs on oceanographic methodology. 1. Determination of photosynthetic pigments in seawater. P., 1966. 69 p.
- Smith W.O., Nelson D.M. Importance of ice edge phytoplankton production in Southern Ocean // Bioscience. 1986. Vol. 36, N 4. P. 251–257.