

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КИСЛОРОДА АРКТИЧЕСКОГО ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЬДА В СВЯЗИ С АКТИВАЦИЕЙ РОСТА ФИТОПЛАНКТОНА НА ГРАНИЦЕ ТАЮЩЕГО ЛЬДА

ЛОБЫШЕВ В. И., МЕЛЬНИКОВ И. А., ЕСИКОВ А. Д., НЕЧАЕВ В. В.

Измерены изотопный состав кислорода, содержание хлорофилла и каротиноидов в дрейфующем льде станции «Северный полюс-23». На кривых зависимости концентрации фитопланктона от относительного содержания ^{18}O в пробах льдов обнаружена точка, соответствующая $-1,2\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, при которой концентрация фитопланктона минимальна. Изменения содержания ^{18}O относительно указанной точки, наблюдаемые в интервале от 3 до -6‰ , коррелируют с увеличением средней концентрации микроорганизмов. Увеличение концентрации фитопланктона проявляется сильнее при уменьшенном количестве тяжелого изотопа кислорода.

Широко известен факт бурного развития микроорганизмов на границе тающего льда [1—3]. Одна из гипотез, объясняющих этот феномен, исходит из активирующего влияния малых вариаций изотопного состава природных вод. Основания для такого предположения появились в 1933 г., когда Банесом впервые было показано, что четырехкратное увеличение концентрации дейтерия относительно среднего содержания в природной воде, примерно равного 0,015%, оказывает значительное влияние на развитие ряда низших водорослей [4]. Сходство полученных результатов с влиянием талой воды дало основание говорить о том, что возможная причина действия талой воды на микроорганизмы состоит в увеличении концентрации дейтерия [5].

В работах Б. Н. Родимова и И. В. Торопцева с сотр. [6—8] изучено активирующее влияние талой воды, полученной из снега, на ряд биологических процессов. Эти результаты в свою очередь интерпретируются как следствие пониженного содержания дейтерия в воде, полученной из снега. Убедительно доказано преимущество этой интерпретации по сравнению с концепцией о благотворном влиянии льдообразных ассоциатов, предположительно сохраняющихся в талой воде. Хлореллу выращивали в трех средах, приготовленных на талой воде, содержащей около 0,012% дейтерия, талой воде с добавлением 0,03 мл D_2O на 1 л воды и водопроводной (контроль). В случае талой воды получено почти двукратное увеличение биомассы относительно контроля, в то время как в двух последних вариантах опыта результаты оказались близкими [8]. Аналогичные результаты обнаружены при предпосевном замачивании семян ячменя [7]. Эти эксперименты показывают также, что активирующее влияние талой воды нельзя объяснить наличием неидентифицированных примесей, содержащихся в снеге.

Ускорение прорастания овса получили также Глейсон и Фридман [9], выращивавшие овес на воде, полученной из антарктического льда, с пониженным содержанием ^{18}O (на 49‰) и дейтерия (на 400‰) относительно стандарта SMOW.

Ранее нами было обнаружено активирующее влияние малых добавок дейтерия (менее 1%) к нормальной воде на скорость ферментативного гидролиза АТФ препаратом Na,K-ATFазы [10] и на регенерацию гидроидных полипов *Obelia geniculata* [11].

Таким образом, результаты, полученные различными авторами, убедительно свидетельствуют о существенном, аномальном с точки зрения существующей теории кинетических и термодинамических изотопных

эффектов [12], влиянии малых вариаций изотопного состава воды на ряд биологических процессов. Для понимания причин наблюдаемых эффектов необходимо изучить концентрационную зависимость для малых концентраций дейтерия.

В связи с тем что в процессе генезиса морского дрейфующего льда наблюдаются изменения его изотопного состава, мы попытались обнаружить связь между количеством одноклеточных водорослей и изотопным составом льда.

Материалы и методы. Образцы брали на дрейфующей станции «Северный полюс-23» с июня по октябрь 1977 г. и в апреле 1978 г. Колонки льда диаметром 18 см и длиной, равной толщине многолетнего льда, вырезали на небольшой площади для уменьшения систематической ошибки, обусловленной различиями в структуре льда. Вмораживание мерной рейки в лед после взятия первой пробы обеспечило возможность определения абсолютного значения координаты толщины льда. Образцы льда длиной около 30 см получали из колонки льда высотой около 2,5 м. В полученных образцах измеряли соленость, концентрации фосфата, кремния, хлорофилла, каротиноидов, содержание тяжелого изотопа кислорода ^{18}O . Измерен также изотопный состав снега и морской воды. Концентрацию хлорофилла и каротиноидов определяли спектрофотометрически по методу [13] непосредственно на станции. Изотопные измерения проводили методом масс-спектрометрии [14] на приборе GD-150 Varian mat (ФРГ). Образцы подготавливали методом изотопного уравнивания с углекислым газом. Среднеквадратичная ошибка относительных измерений составляла $\pm 0,2\text{‰}$. Содержание ^{18}O выражали в единицах промилле от международного стандарта SMOW согласно формуле

$$\delta^{18}\text{O} = (R/R_{\text{SMOW}} - 1) \cdot 10^3, \text{‰},$$

где $R = [^{18}\text{O}]/[^{16}\text{O}]$.

По техническим причинам мы не могли измерить концентрацию дейтерия в среде, однако есть основания полагать, что существует линейная корреляция между концентрацией тяжелых изотопов водорода и кислорода в природных водах. Такая корреляция для атмосферных осадков была найдена экспериментально:

$$\delta\text{D} = 8,0 \delta^{18}\text{O} - 10,$$

и носит название линии Крейга [15].

Результаты и обсуждение. Измерено содержание ^{18}O в образцах пяти колонок льда. Характер изменений изотопного состава льда можно видеть на рис. 1, где представлена зависимость содержания ^{18}O от толщины льда для трех колонок, взятых в июне, июле и апреле. Нулевая отметка соответствует поверхности льда. Вследствие таяния льда в летний период нулевая отметка понижается, однако общая толщина льда почти не меняется из-за намерзания опресненной воды на нижней поверхности льда. Из приведенного рисунка видно, что содержание ^{18}O не монотонно меняется по толщине льда, что связано с сезонной периодичностью. Кроме того, видна направленная диффузия тяжелого изотопа кислорода в глубь льда от его поверхности, что можно объяснить фракционированием изотопов в градиенте температуры, т. е. термодиффузией. Уменьшение содержания ^{18}O объясняется намерзанием талой снеговой воды, проникающей под лед, а увеличение — намораживанием льда из морской воды. Минимальное содержание ^{18}O в чистом весеннем снеге составляло $-33,3\text{‰}$ и варьировало от $-21,1$ до $-12,4\text{‰}$ в летних снежниках. Содержание ^{18}O в морской воде на глубине 5–35 м от нижней поверхности льда составляло в среднем $-5,5\text{‰}$. Среднее содержание изотопа ^{18}O в образцах льдов выше и составляло около $-2,0\text{‰}$. Таким образом, в соответствии с термодинамикой фракционирования изотопов при замораживании водных растворов солей [16] наблюдается некоторое «утяжеление» морского льда. Среднее содержание

^{18}O в колонках льда с июня по октябрь монотонно возрастает от $-2,7$ до $-0,7\text{‰}$ и уменьшается к апрелю до $-2,6\text{‰}$. В колонках льда содержание ^{18}O варьирует от -6 до 3‰ .

Была проанализирована возможная связь этих вариаций изотопного состава воды с концентрацией фосфатов, кремния, хлорофилла и каротиноидов. Корреляция между изотопным составом и концентрацией фосфатов, кремния и хлорофилла, характеризующего содержание зеленых водорослей, не выявлена. Обнаружена линейная корреляция концентрации ^{18}O с количеством каротиноидов в образцах осенне-зимнего

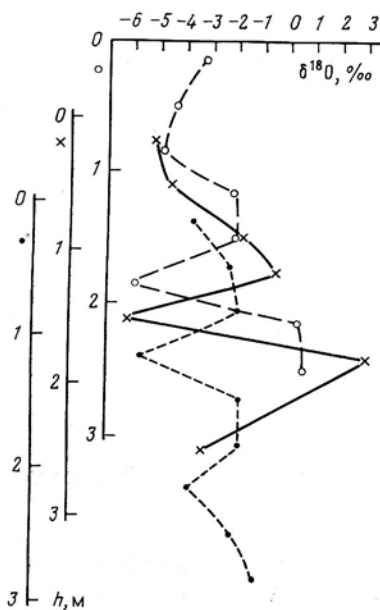


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость изотопного состава кислорода от толщины льда. $\circ$ — июнь; $\times$ — июль 1977 г.; $\bullet$ — апрель 1978 г. Начало отсчета смещается вследствие таяния льда

Рис. 2. Корреляция относительной концентрации каротиноидов с изотопным составом кислорода в образцах льдов

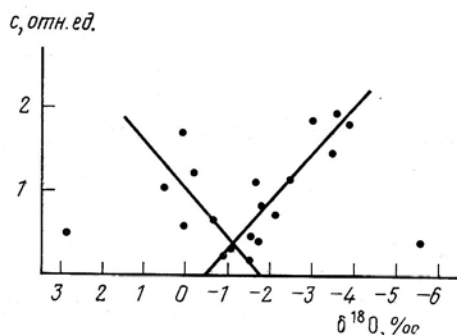


Рис. 2

льда. Данные для этих образцов представлены на рис. 2. Точки, соответствующие $2,8$ и $-5,6\text{‰}$, исключены из рассмотрения. Основная совокупность точек может быть описана двумя линиями регрессии, изображенными на рисунке. Левая ветвь описывается уравнением $K=1,02+0,57\delta^{18}\text{O}$. При $n=8$ коэффициент корреляции r равен $0,767$ (отличается от 0 при 1% -ном уровне значимости). Правая ветвь описывается уравнением $K=-0,33-0,59\delta^{18}\text{O}$. При $n=10$, $r=0,877$ и отличается от 0 даже при $0,1\%$ -ном уровне значимости.

Обращает на себя внимание точка пересечения линий регрессии. Она соответствует содержанию $\delta^{18}\text{O}$, равному $-1,2\text{‰}$. Эта величина очень близка к содержанию $\delta^{18}\text{O}$ в воде океана третичного периода, равному $-1,3\text{‰}$ [17]. В этой точке концентрация каротиноидов, отражающая количество синезеленых водорослей в образцах, минимальна. Таким образом, относительно этой точки как *уменьшение*, так и *увеличение* концентрации ^{18}O в рассмотренных образцах льда коррелируют с ростом концентрации синезеленых одноклеточных водорослей.

Распределение средних концентраций хлорофилла и каротиноидов во всех образцах льдов (гистограммы 2 и 3) представлено на рис. 3. Сравнение этих гистограмм с гистограммой распределения изотопа ^{18}O в образцах льдов (гистограмма 1) показывает, что, хотя максимальное количество образцов льда содержит около $-1,5\text{‰}$ ^{18}O , ему соответствует минимальная средняя концентрация как каротиноидов, так и хлорофилла. «Облегчение» и «утяжеление» изотопного состава льда сопровождается увеличением средней концентрации синезеленых и зеленых водорослей. Наиболее сильная «активация» наблюдается во льду с «об-

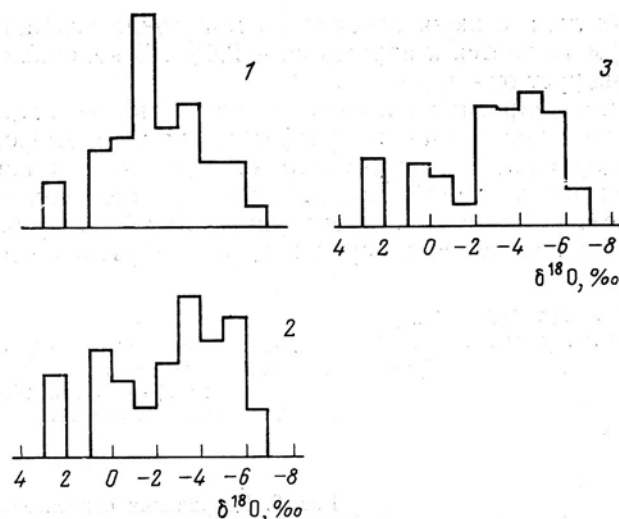


Рис. 3. Гистограммы: 1 — распределения проб по изотопному составу, 2 и 3 — средних значений относительных концентраций хлорофилла и каротиноидов соответственно

легченным» изотопным составом. Следует отметить, что наибольший вклад в эту асимметрию вносят данные, полученные в июне, т. е. во время максимальной биологической активности, наблюдающейся не только в поверхностном слое, но и во всей толще льда. Особо хочется подчеркнуть, что обнаруженная связь между изотопным составом кислорода, а с учетом линии Крейга также водорода льда и содержанием фитопланктона имеет характер корреляций и не может быть доказательством причинной связи двух этих величин вследствие многочисленности действующих факторов на развитие микрофлоры.

Таким образом, изложенный выше материал показывает, что существует корреляция между концентрацией фитопланктона и изотопным составом воды, изменяющимся вследствие естественных природных процессов. Причины такой зависимости в настоящее время не ясны и подлежат исследованию в лабораторных условиях.

Авторы благодарят С. Э. Шноля за полезные критические замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zubov N. N. Северный морской путь, 1935, № 2, с. 45.
2. Усачев Л. И. Тр. Арктического ин-та, 1935, т. 21, с. 11.
3. Шишов П. П. Тр. Арктического ин-та, 1937, т. 82, с. 47.
4. Barnes T. C. Amer. J. Botany, 1933, v. 20, № 10, p. 681.
5. Barnes T. C., Jahn T. L. Quart. Rev. Biol., 1934, v. 9, № 3, p. 292.
6. Родимов Б. Н. Сельское хозяйство Сибири, 1961, № 7, с. 66.
7. Родимов Б. Н., Маршунина А., Яфарова И. Сельскохозяйственное производство Сибири и Дальнего Востока, 1965, № 4, с. 56.
8. Горюнов И. В., Родимов Б. Н., Маршунина А. М., Яфарова И. О., Садовникова В. И., Лобина И. Г. В кн.: Вопросы радиобиологии и гематологии. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 1966, с. 118.
9. Gleason J. D., Friedman I. Nature, 1975, v. 256, p. 305.
10. Лобышев В. И., Твердислов В. А., Яковенко Л. В., Фогель Ю. Биофизика, 1978, т. 23, № 2, с. 390.
11. Лобышев В. И. Биофизика, 1983, т. 28, № 4, с. 666.
12. Родинский С. З., Шноль С. Э. Изотопы в биохимии. М.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 595.
13. UNESCO Monographs on oceanographic methodology. 1. Determination of photosynthetic pigments in sea water. Paris: UNESCO, 1966, p. 9—18.
14. Есиков А. Д. Масс-спектрометрический анализ природных вод. М.: Наука, 1980, с. 203.
15. Брезгунов В. С. В кн.: Изотопия природных вод. М.: Наука, 1978, с. 10.

16. O'Neil J. R. J. Phys. Chem., 1968, v. 72, p. 3683.
17. Николаев С. Д. В кн.: VII Всес. симп. по стабильным изотопам в геохимии. М., 1978, с. 317.

Физический факультет МГУ

им. М. В. Ломоносова

Институт океанологии им. П. П. Ширшова
АН СССР, Москва;

Институт водных проблем АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
19.VII.1983

После доработки
4.X.1983

**STUDY OF OXYGEN ISOTOPE COMPOSITION OF ARCTIC
DRIFTING ICE IN RELATION TO ACTIVATION
OF PHYTOPLANKTON GROWTH ON THE BOUNDARY OF MELTING ICE**

LOBYSHEV V. I., MEL'NIKOV I. A., ESIKOV A. D., NECHAEV V. V.

Physics Department, M. V. Lomonosov Moscow State University;

P. P. Shirshov Institute of Oceanology;

Institute of Water Problems, Ac. Sci. USSR, Moscow

Isotope composition of oxygen, chlorophyll and carotinoid content in drifting ice of «North pole-23» were measured. The point equaling 1.2‰ $\delta^{18}\text{O}$ at which phytoplankton concentration was minimized was discovered. In relation to this point changes of $\delta^{18}\text{O}$ content observed within 3—6‰ correlate with an increase of mean concentration of microorganisms. This effect is stronger when the amount of heavy isotope is smaller.