

551.464.6:581.526.325 (269.43)

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, МЕЖГОДОВЫЕ И СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
СОДЕРЖАНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОРЕ СКОТИЯ****Н. В. Аржанова**

Исследования в море Скотия на НПС «Академик Книпович» были начаты в 1965 г., затем с 1967 по 1971 г. экспедиции осуществлялись ежегодно. Исследования проводили в научно-промысловых целях. Этим объясняется неравномерность распределения станций на акватории моря; наиболее детально и подробно исследованы районы о-ва Южная Георгия, Фолклендских островов, Южных Оркнейских островов, а также южная область моря Скотия, лежащая к востоку от Южных Оркнейских островов. Кроме того, ежегодно, насколько позволяли условия, осуществлялось несколько разрезов, пересекающих море Скотия. В основном исследования проводили в летне-осенний период, кроме 1971 г., когда работы велись зимой и на части исследуемой акватории — весной.

Вопросы, связанные с изучением биологической продуктивности вод, имеют первостепенное значение, поэтому фосфор и кремний интересуют нас в первую очередь как химическая база, на основе которой создается первичная биологическая продукция. Прежде всего необходимо оценить степень обеспеченности фитопланктона фосфором и кремнием, которые ему необходимы в процессе жизнедеятельности.

В море Скотия и прилежащих водах, как и в других районах с довольно четко выраженной сезонностью, обогащение фотического слоя питательными солями осуществляется главным образом за счет осенне-зимнего конвективного перемешивания. Следовательно, содержание фосфора и кремния в слое, охваченном перемешиванием, характеризует обеспеченность фитопланктона этими элементами к началу вегетационного периода.

Слой осенне-зимнего конвективного перемешивания характеризуется более или менее равномерным распределением биогенных элементов, в том числе фосфора и кремния по вертикали (рис. 1), поэтому в качестве характеристики этого слоя мы использовали среднюю концентрацию фосфора и кремния для всего слоя.

Характер горизонтального распределения фосфора и кремния, а также изменение толщины этого слоя в исследуемом районе обуславливается распределением водных масс, положением фронтальных зон.

Как известно, в море Скотия и прилежащих водах по горизонтали выделяются две основные водные массы — относительно теплая субантарктическая и холодная антарктическая поверхностная, — разделенные зоной Антарктической конвергенции. Антарктическая поверхностная масса представлена в море Скотия двумя ее разновидностями — водами Циркумполярного течения и водами моря Уэдделла, между которыми расположена вторичная фронтальная зона (Масленников, 1969; Богданов и др., 1969; Масленников и др., 1971).

Зимой 1971 г. к югу и юго-востоку от зоны Антарктической конвергенции осенне-зимнее конвективное перемешивание распространя-

лось до глубины 150—200 м, т. е. им была охвачена практически вся толща антарктической поверхностной водной массы. К северу от зоны Антарктической конвергенции, в субантарктической водной массе, этот слой был более мощным и распространялся до глубины 250—300 м (см. рис. 1).

Основной закономерностью горизонтального распределения фосфора и кремния в исследованном районе было увеличение концентрации с севера на юг (рис. 2).

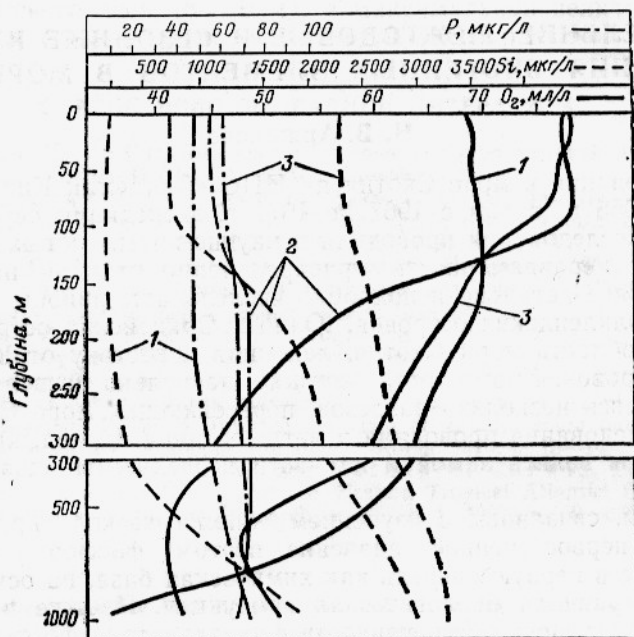


Рис. 1. Вертикальное распределение кислорода (в мл/л), фосфора (в мкг/л) и кремния (в мкг/л):

1 — в субантарктической водной массе (ст. 13; ш. = 48°48' S, д. = 56°11' W, 21/VII 1971); 2 — в водах Циркумполярного течения (ст. 58; ш. = 54°11' S, д. = 34°35' W, 13/VIII 1971); 3 — в водах моря Уэдделла (ст. 126; ш. = 59°54' S, д. = 43°57' W, 1/X 1971).

Субантарктические воды характеризовались наименьшим содержанием биогенных элементов (20—50 мкг P/л; 100—250 мкг Si/л), воды Циркумполярного течения — более высоким (250—1250 мкг Si/л, 50—65 мкг P/л). В водах моря Уэдделла концентрация кремния максимальная (2000—2750 мкг/л), концентрация фосфора примерно такая же, как и в водах Циркумполярного течения (60—65 мкг/л). Относительное изменение концентрации кремния на исследованной акватории происходило в гораздо более широких пределах, чем фосфора. Кроме того, если концентрация фосфора на большей части увеличивалась с севера на юг довольно равномерно, концентрация кремния резко изменялась (с 1250—1500 до 2250—2750 мкг/л) на небольшом участке в районе вторичной фронтальной зоны в области смешения вод Циркумполярного течения и моря Уэдделла. Как неоднократно отмечалось различными авторами (Орадовский и др. 1969; Богданов и др. 1969; Хвацкий, 1972), максимальный горизонтальный градиент в распределении концентрации кремния может служить критерием для выявления вторичной фронтальной зоны.

Как правило, в зоне смешения вод Циркумполярного течения и моря Уэдделла не наблюдалось резкого перепада температуры на поверхности, так как вторичная фронтальная зона разделяет не разно-

качественные, а только несколько модифицированные воды поверхностной антарктической водной массы (Солянкин, 1972). Поэтому лишь с помощью анализа вертикальной температурной структуры водной толщи до глубины 400—500 м можно выделить вторичную фронтальную зону. Довольно четко эти воды разделяются также по содержанию

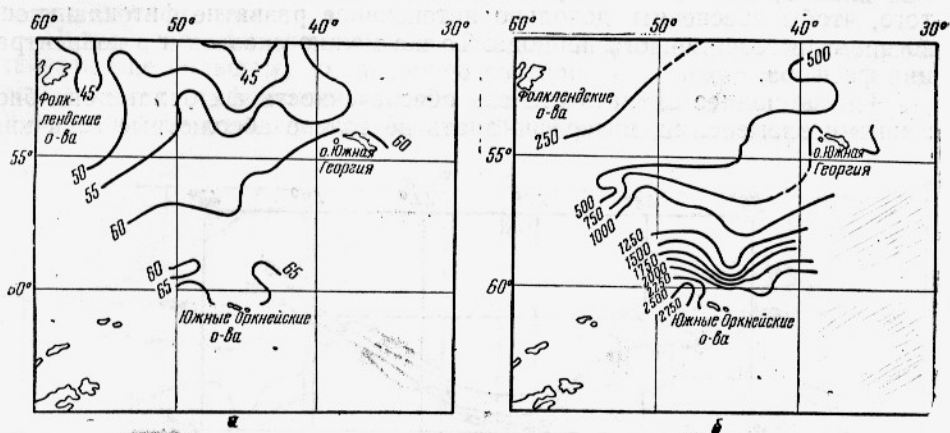


Рис. 2. Распределение в слое осенне-зимнего конвективного перемешивания (зима 1971 г.):  
а — фосфора, мкг/л; б — кремния, мкг/л.

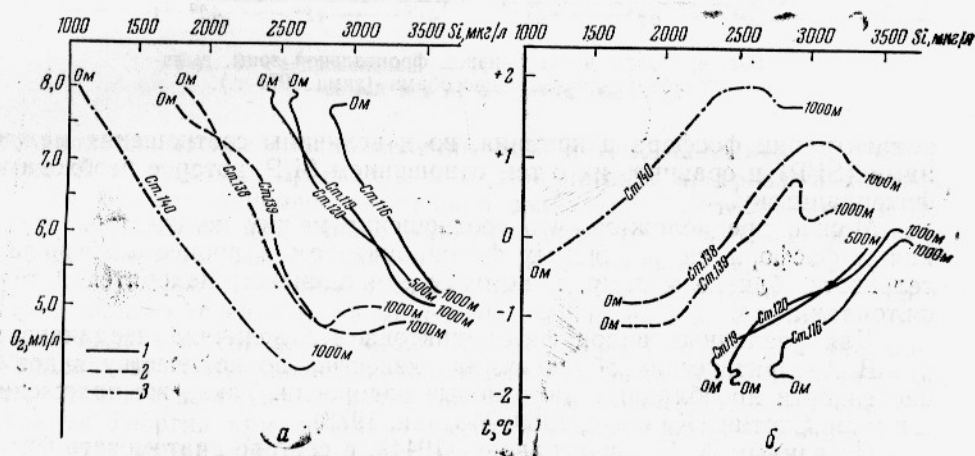


Рис. 3. Типы кривых в районе вторичной фронтальной зоны (зима 1971 г.):

а — Si—O<sub>2</sub>; б — t°—Si;  
1 — воды моря Уэдделла; 2 — смешанные воды; 3 — воды Циркумполярного течения.

кислорода на глубинах больше 200 м, увеличивающемся с севера на юг.

Выявить положение вторичной фронтальной зоны можно на основе анализа t°—Si и Si—O<sub>2</sub>-кривых, четко подразделяющихся на три типа. Это кривые, присущие водам Циркумполярного течения, водам моря Уэдделла, смешанным водам (рис. 3). Положение границы вод Циркумполярного течения и моря Уэдделла, выявленное всеми перечисленными способами, практически совпало (рис. 4). Такое сравнение проведено лишь для того, чтобы подтвердить справедливость нашего предыдущего вывода о возможности использования для этой цели изменения содержания кремния в поверхностном слое. Такой способ выявления вторичной фронтальной зоны — наиболее простой, быстрый и оперативный.

В данном случае мы использовали концентрацию кремния в качестве косвенного показателя различных вод.

Абсолютные величины содержания кремния, если опираться на данные В. В. Волковинского (1968) о величинах, лимитирующих продуктивный фотосинтез, в антарктической поверхностной водной массе достаточны для того, чтобы обеспечить довольно интенсивное развитие фитопланктона во время вегетационного периода. То же можно сказать и о концентрации фосфора.

Чтобы полнее оценить степень обеспеченности фитопланктона биогенными элементами, интересно знать не только абсолютные величины

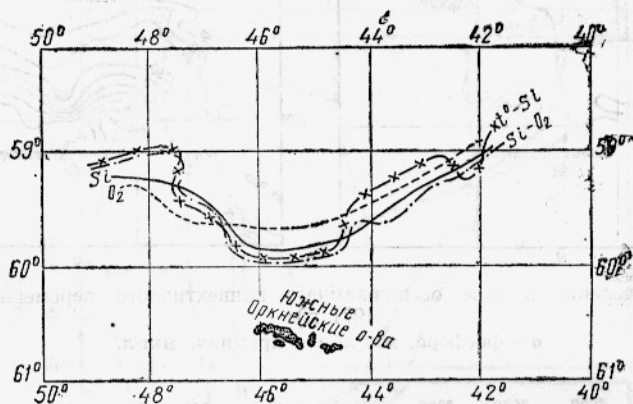


Рис. 4. Положение вторичной фронтальной зоны, выявленное различными способами (зима 1971 г.).

концентрации фосфора и кремния, но и величины соотношения между ними ( $Si/P$ ) и сравнить их с тем отношением  $Si/P$ , которое необходимо фитопланктону.

Можно предположить, что соотношение между количеством кремния и фосфора, потребляемых фитопланктоном в процессе жизнедеятельности, близко к тому, в котором эти элементы находятся в теле фитопланктона.

Для различных видов фитопланктона эта величина неодинакова.

В Антарктических областях, как известно, по количеству видов и численности преобладают диатомовые водоросли. Такое же положение и в море Скотия (Канаева, 1969; Мовчан, 1973).

По данным А. П. Виноградова (1944), в составе диатомового фитопланктона 17,38% кремния, 0,60% фосфора (на сухую массу), т. е. они находятся в соотношении 29:1. Следовательно, приблизительно в таком соотношении они и должны потребляться фитопланктоном из воды.

Величины отношения кремния к фосфору ( $Si/P$ ), наблюдавшиеся в слое осенне-зимнего конвективного перемешивания зимой 1971 г., изменялись в довольно широких пределах — от 3 до 45, увеличиваясь с севера на юг, особенно резко в районе вторичной фронтальной зоны (рис. 5, а). Так как концентрация фосфора на большей части исследованного района в антарктической водной массе изменялась в относительно небольших пределах, мы связываем такие колебания величины  $Si/P$  с изменением концентрации кремния. На большей части исследованной акватории отношение  $Si/P$  меньше того, в котором они потребляются фитопланктоном. Это свидетельствует о том, что из двух рассматриваемых элементов кремний во время вегетационного периода может оказаться в количестве, лимитирующем развитие фитопланктона.

На юге моря Скотия, в водах моря Уэдделла отношение больше, чем необходимо фитопланктону. Теоретически это значит, что в данном районе элементом, лимитирующим развитие фитопланктона, может оказаться фосфор. Однако в действительности концентрация фосфора здесь так высока, что мало вероятно, чтобы она уменьшилась во время вегетационного периода до очень маленьких величин, ограничивающих развитие фитопланктона.

Потребление фитопланктоном кремния и фосфора должно способствовать еще большему уменьшению соотношения между ними в фотическом слое в тех районах, где оно было меньше 29 и увеличению его на юге моря Скотия, где оно больше 29. Наглядной иллюстрацией это-

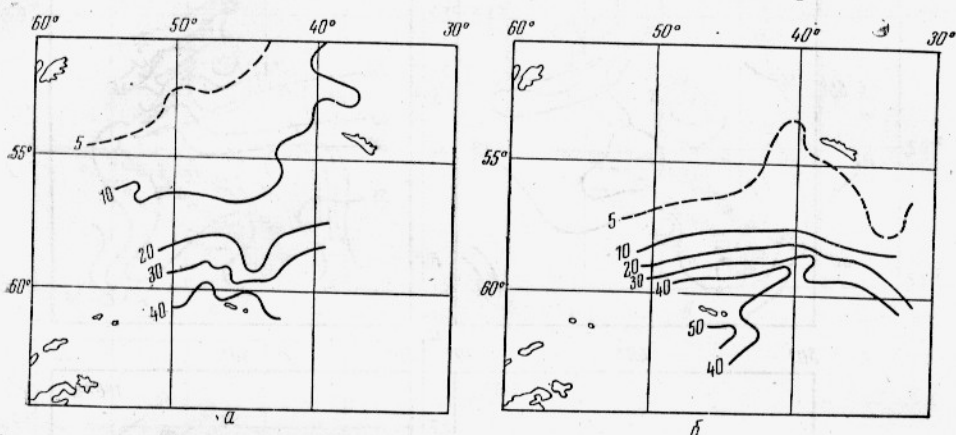


Рис. 5. Распределение величин Si/P в море Скотия:  
а — зимой 1971 г.; б — летом 1968 г.

го является распределение величин Si/P летом, например в 1968 г. (рис. 5, б). Данные приведены для слоя летнего прогрева, в котором весной и летом наиболее интенсивно развивается фитопланктон и который отделен от остаточного холодного зимнего слоя более или менее хорошо выраженным скачком плотности (Масленников, 1969).

Летом 1968 г. величина отношения Si/P на большей части Циркумпольного течения была менее 10, а в районе о-ва Южная Георгия уменьшилась почти до единицы. На юге моря Скотия, в водах моря Уэдделла эта величина в некоторых районах была более 50 и даже 60, что связано, вероятно, с интенсивностью фотосинтеза. В районе о-ва Южная Георгия при довольно высокой концентрации фосфора (30—50 мкг/л) кремния в некоторых областях содержалось настолько мало (<100 мкг/л) что он, по-видимому, ограничивал развитие фитопланктона (рис. 6).

В водах моря Уэдделла концентрация фосфора и кремния оставалась высокой (55—65 мкг P/л; 2500—3000 мкг Si/л).

В общем характер распределения фосфора и кремния летом был аналогичен зимнему: более однородное и равномерное относительное распределение фосфора и гораздо более существенные изменения концентрации кремния, наиболее резкие в районе вторичной фронтальной зоны.

Что касается отдельных более ограниченных районов моря, то распределение фосфора и кремния хорошо согласовывалось в них с динамикой вод, присущей этому району. Такая зависимость, например, хорошо прослеживалась в районе Южных Оркнейских островов, а также в районе о-ва Южная Георгия в конце лета и начале осени.

Пространственное распределение фосфора и кремния зависит также от интенсивности фотосинтеза. Это обусловлено тем, что концен-

трация биогенных элементов перед началом вегетационного периода нигде не лимитирует развитие фитопланктона, и интенсивность фотосинтеза определяется здесь другими факторами. Там, где эти факторы способствуют более интенсивному фотосинтезу и, следовательно, более интенсивному потреблению биогенных элементов, происходит заметное снижение их концентрации. Влияние интенсивности фотосинтеза на распределение биогенных элементов еще больше должно подчеркивать

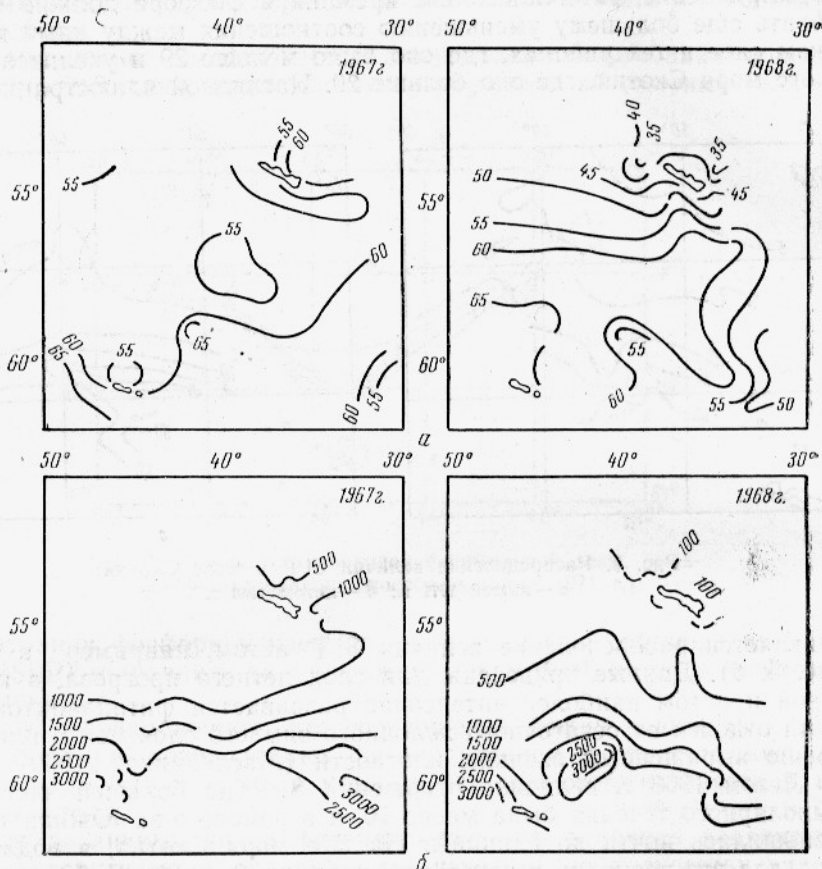


Рис. 6. Распределение в море Скотия летом в слое летнего прогрева, мкг/л:  
а — фосфора; б — кремния.

связь этого распределения с динамическими условиями, так как одним из факторов, определяющих распределение фитопланктона является, вероятно, динамика вод.

Особенно четко связь горизонтального распределения фосфора и кремния с интенсивностью фотосинтеза прослеживается в начале вегетационного периода, во время наибольшей интенсивности фотосинтеза. Так, весной 1971 г. в районе о-ва Южная Георгия наблюдалось полное соответствие между концентрацией фосфора, кремния, насыщенным водородом и биомассой фитопланктона: в местах наибольшей биомассы фитопланктона было отмечено максимальное пересыщение водородом и минимальное содержание фосфора и кремния (рис. 7).

Нельзя также отрицать влияния на узкие прибрежные полосы стока с суши; в северной части моря Скотия имеет значение и степень влияния северных или южных вод.

Межгодовые изменения фосфора и кремния мы смогли проследить, сравнивая данные для конца лета 1965, 1967, 1968, 1969 гг. Наиболее значительные изменения концентрации фосфора и кремния в слое летнего прогрева наблюдались в водах Циркумполярного течения. Особенно ярко это выражено в районе о-ва Южная Георгия, где относительные межгодовые изменения фосфора и особенно кремния были максимальными. По абсолютным величинам концентрации фосфора

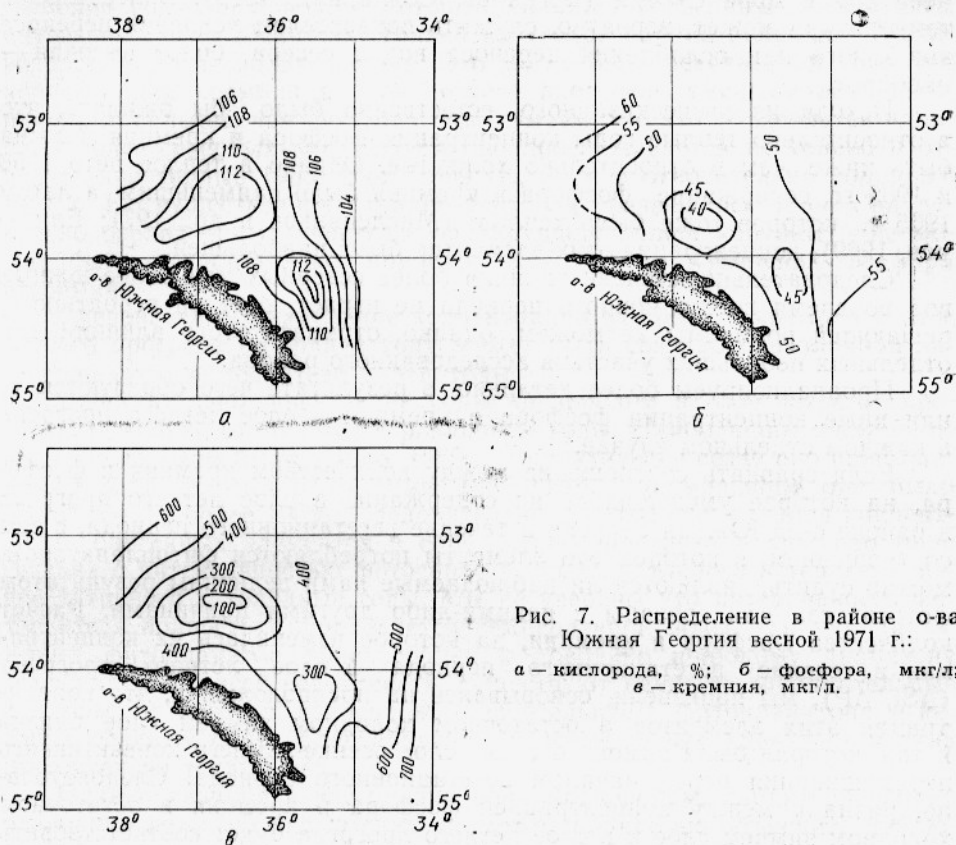


Рис. 7. Распределение в районе о-ва Южная Георгия весной 1971 г.:

а — кислорода, %; б — фосфора, мкг/л; в — кремния, мкг/л.

и кремния в слое летнего прогрева в районе о-ва Южная Георгия рассматриваемые годы можно разделить на две группы: 1965 и 1967 гг., когда содержание этих элементов было максимальным (55—60 мкг P/л; 300—1300 мкг Si/л); 1968 и 1969 гг., когда их концентрация была значительно ниже (концентрация фосфора изменялась от 20 до 50 мкг/л, кремния нигде не превышала 250 мкг/л, а в некоторых областях была менее 100 мкг/л) (см. рис. 6).

Вызывает интерес, во-первых, уже сам факт существования летом 1968 и 1969 гг. областей с очень низким содержанием кремния и, во-вторых, большие различия в содержании фосфора и кремния в слое летнего прогрева в разные годы.

Мы предполагаем, что причины, вызывающие эти явления, двоякого рода. С одной стороны, это может быть результатом биохимических процессов, в частности фотосинтеза, интенсивность которого изменяется как в пространстве, так и во времени, — от года к году. С другой стороны, это может зависеть от степени влияния на формирование гидрохимического режима района о-ва Южная Георгия северных вод, более бедных биогенными элементами, либо южных вод, более богатых ими. Влияние этих вод, как мы предполагаем, осуществляется в ре-

зультате нагона поверхностных вод под воздействием ветра соответствующего направления и распространяется на весь слой, захваченный вертикальным перемешиванием.

К сожалению, мы не имеем достаточных данных о направлении и силе ветра в определенные сезоны года, поэтому будем пользоваться косвенным показателем — температурой воздуха в районе о-ва Южная Георгия, изменение которой может свидетельствовать о характере переноса вод в море Скотия (Богданов, Солянкин, 1970). Более низкая температура может, вероятно, служить показателем усиления переноса вод с юга или ослабления переноса вод с севера, более высокая — наоборот.

Исходя из вышесказанного, естественно было бы ожидать, что в относительно теплые годы концентрация фосфора и кремния должна быть ниже, чем в относительно холодные. Однако в теплое лето 1968 и 1969 гг. содержание фосфора и кремния было наименьшим, а летом 1965 г., которое тоже было теплым (Масленников и др., 1971; Елизаров, 1969), концентрация этих элементов была наибольшей.

Следовательно, степень влияния более северных или более южных вод во время вегетационного периода не играет, по всей вероятности, решающей роли. Мы не можем, однако, отрицать этого влияния для отдельных небольших участков исследованного района.

Проанализируем более детально, в результате чего образуются те или иные концентрации фосфора и кремния в слое летнего прогрева в каждом отдельном случае.

Если сравнить соотношение между количеством кремния и фосфора, на которое уменьшилось их содержание в слое летнего прогрева в районе о-ва Южная Георгия в течение вегетационного периода, с тем соотношением, в котором эти элементы потребляются фитопланктоном, можно судить, являются ли наблюдаемые нами величины результатом фотосинтеза или связаны с какими-либо другими причинами. Расчет количества фосфора и кремния, на которое изменилась их концентрация в течение вегетационного периода в слое летнего прогрева ( $\Delta Si$ ,  $\Delta P$ ), мы произвели, основываясь на предположении, что концентрация этих элементов в остаточном холодном зимнем слое близка к той, которая была зимой во всем слое осенне-зимнего конвективного перемешивания перед началом вегетационного периода. Следовательно, разница между концентрацией фосфора и кремния в остаточном холодном зимнем слое и в слое летнего прогрева будет соответствовать (близко) количеству, на которое уменьшилось их содержание летом.

Таким образом были получены величины  $\Delta Si$  и  $\Delta P$  в районе о-ва Южная Георгия для лета 1965, 1967, 1968 и 1969 гг. и рассчитано соотношение между ними (Аржанова, 1971).

При этом мы не учитывали процесс распада органического вещества и растворения створок диатомовых, что вносит соответствующую ошибку в абсолютные величины  $\Delta Si$  и  $\Delta P$ . Ошибка эта, по-видимому, не очень велика, так как указанные процессы при наблюдающейся здесь температуре проходят крайне медленно и, кроме того, они протекают как в слое летнего прогрева, так и в остаточном холодном слое.

Таким образом, полученные величины  $\Delta Si$  и  $\Delta P$  не могут претендовать на высокую точность. Однако на данном этапе это не имеет существенного значения, важен лишь порядок получаемых величин  $\Delta Si/\Delta P$ , чтобы оценить, какой из возможных факторов имеет преобладающее значение. Как указывалось выше, в районе о-ва Южная Георгия преобладает диатомовый фитопланктон, который в процессе жизнедеятельности потребляет кремний и фосфор в отношении 29 : 1. Существование наряду с диатомовыми некоторого количества жгутиковых и перидиниевых, которым кремний и фосфор требуется в гораздо меньшем соотношении (например, для перидиниевых  $Si/P=4:1$ ), может



привести к тому, что наблюдаемое отношение потребленного кремния и фосфора в водах исследуемого района будет меньше 29.

С учетом сказанного выше при анализе рассчитанных величин  $\Delta Si/\Delta P$  можно считать, что на большей части района наблюдаемая концентрация фосфора и кремния явилась результатом главным образом фотосинтеза (величина  $\Delta Si/\Delta P = 15 \div 50$ ), что подтверждается соответствием между концентрацией фосфора и кремния и величиной насыщения воды кислородом, который является косвенным показателем интенсивности фотосинтеза. Только на севере района величина  $\Delta Si/\Delta P$  возрастает до нескольких сотен. Это могло быть результатом того, что концентрация кремния в слое летнего прогрева уменьшилась несомненно сильнее, чем фосфора. Мы думаем, что это объясняется влиянием более северных вод, причем оно прослеживается не только в относительно теплые 1965, 1968, 1969 гг., но и в относительно холодный 1967 г. Но существенное влияние этих вод сказывалось только на довольно ограниченных участках, не нарушало общей картины и не может быть, следовательно, причиной межгодовых изменений фосфора и кремния.

Следовательно, изменение концентрации фосфора и кремния в слое летнего прогрева от года к году может быть связано с различной интенсивностью фотосинтеза в эти годы.

Действительно, насыщение воды кислородом в слое летнего прогрева несколько отличается в различные годы. Наибольшим насыщением воды кислородом было в 1968, 1969 гг.: практически везде оно превышало 100% и достигало местами 108—113%. Наименьшим оно было в 1967 г. — не более 100%. Следовательно, межгодовая разница концентрации биогенных элементов в слое летнего прогрева в какой-то мере связана с интенсивностью фотосинтеза, более активного в теплые и менее активного в холодные годы. Мы не уверены что интенсивность фотосинтеза полностью определяется температурой воды, так как диатомовый фитопланктон приспособлен к довольно широкому диапазону температур. По всей вероятности, существуют какие-то дополнительные факторы, от которых зависит жизнедеятельность фитопланктона и которые создают более благоприятные условия в вегетационный период относительно теплых лет.

Однако разница в насыщении воды кислородом, характеризующая различные годы, на наш взгляд, не может полностью объяснить наблюдаемые различия в содержании биогенных элементов.

По всей вероятности, то количество фосфора и кремния, которое мы наблюдаем в слое летнего прогрева во время вегетационного периода, определяется не только тем, на сколько оно уменьшилось в течение этого периода, а скорее всего, и это основное, тем, каково оно было в этом слое перед началом вегетации фитопланктона, т. е. концентрацией в слое осенне-зимнего конвективного перемешивания.

Как отмечалось, охарактеризовать слой осенне-зимнего конвективного перемешивания мы можем, используя, с некоторыми изложенными выше оговорками, концентрацию фосфора и кремния в остаточном холодном зимнем слое.

Как мы и предполагали, наибольшая концентрация фосфора и кремния перед началом вегетации была в 1965 и 1967 гг. и наименьшая — в 1968 и 1969 гг.

Так, в 1965 и 1967 гг. на большей части исследованной акватории концентрация кремния перед началом вегетационного периода была более 1250 мкг/л, а фосфора — более 60 мкг/л, в то время как в 1968 и 1969 гг. соответственно менее 1000 и 35—65 мкг/л.

Таким образом, межгодовые изменения концентрации P и Si в слое летнего прогрева, прослеженные нами в 1965, 1967, 1968 и 1969 гг.,

связаны в большой степени с межгодовыми изменениями этих концентраций в слое осенне-зимнего конвективного перемешивания. Следовательно, причины нужно искать в условиях, которые существовали в зимние сезоны, предшествующие нашим исследованиям, когда происходило формирование химической базы, на основе которой развивался фитопланктон. Это зимы 1964, 1966, 1967 и 1968 гг. Как оказалось, зимы 1964 и 1966 гг. были холодные ( $t^{\circ}_{\text{возд.}} = -2,5^{\circ}; -1,1^{\circ}$ ), чем зимы 1967 и 1968 гг. ( $t^{\circ}_{\text{возд.}} = -0,6^{\circ}; +0,7^{\circ}$ ), что, вероятно, и явилось решающим фактором, обусловившим концентрацию биогенных элементов в слое осенне-зимнего конвективного перемешивания. В отношении холодные зимы под воздействием ветров южного направления усиливается влияние южных вод, а более сильное охлаждение поверхностных вод способствует тому, что перемешивание распространяется до больших глубин, захватывая более богатые биогенными элементами воды.

Межгодовые изменения содержания биогенных элементов в слое летнего прогрета связаны, следовательно, прежде всего с изменением от года к году условий, при которых происходило формирование слоя осенне-зимнего конвективного перемешивания.

Межгодовые изменения содержания фосфора и кремния в слое летнего прогрета в некоторой степени связаны с интенсивностью фотосинтеза, в процессе которого происходит их потребление.

Влияние северных вод, более бедных фосфором и кремнием, связанное с климатическими и метеорологическими условиями во время вегетационного периода, сказывается на ограниченных участках исследованного района и не меняет общей картины.

На юге моря Скотия, в водах моря Уэдделла концентрация фосфора и кремния практически не менялась от года к году и была на уровне 2000—3000 мкг Si/л и 55—65 мкг P/л.

Отдельные различия в распределении этих элементов связаны главным образом с особенностями динамической топографии для данного года.

Что касается положения вторичной фронтальной зоны, то оно не изменялось существенно, что отмечается и другими авторами (Солянкин, 1972). Абсолютные величины кремния и горизонтальный градиент их в районе вторичной фронтальной зоны также не претерпевают существенных изменений.

Изменение концентрации биогенных элементов в воде в течение года, как известно, наблюдается там, где довольно четко прослеживается смена сезонов, и связано с изменением гидродинамических и биохимических условий.

К сожалению, только в районе о-ва Южная Георгия исследованиями были охвачены все сезоны. Работы проводили здесь в феврале (лето), марте, апреле (осень), августе (зима) и ноябре (весна). Однако имеющиеся у нас данные получены в разные годы, а существующие в этом районе значительные межгодовые колебания фосфора и кремния сильно затрудняют оценку сезонного изменения их концентраций.

Все же мы попытались графически изобразить изменение концентрации фосфора и кремния в поверхностном слое воды в течение года, используя для этой цели осредненные данные тех лет, которые наиболее близки по своим климатическим условиям (рис. 8).

Сезонный ход содержания фосфора и кремния в районе о-ва Южная Георгия выражен довольно четко. Максимум наблюдался в осенне-зимний сезон, что связано с процессом осенне-зимнего конвективного перемешивания и практически полным отсутствием фотосинтеза

из-за низкой температуры, а главным образом из-за короткого светового дня. Минимум отмечен в весенне-летний период, когда в результате прогрева верхний слой обособляется от нижележащих вод слоем скачка плотности и биогенные элементы в нем потребляются в процессе фотосинтеза.

Судя по характеру кривой, максимум содержания фосфора наступает в районе о-ва Южная Георгия раньше, чем кремния, а изменения кремния более существенны, чем фосфора.

Armstrong (1965) и Clowes (1938) связывали изменение концентрации кремния в основном с потреблением его в процессе жизнедеятельности фитопланктона и отмечали, что в районе о-ва Южная Георгия это потребление может превышать 80% от первоначального содержания. В нашем случае содержание кремния во время вегетационного периода уменьшилось на 79%, а фосфора — на 59%. В отдельные годы эти изменения были еще существеннее.

Мы предполагаем, что сезонные изменения в районе о-ва Южная Георгия объясняются не только перечисленными причинами, но и изменением степени влияния северных или южных вод.

В 1969 г. исследования в районе о-ва Южная Георгия проводили летом (начало февраля) и осенью (конец марта). Осенью по сравнению с весной увеличилась концентрация фосфора и кремния в верхнем слое. Чтобы рассчитать прирост фосфора, который произошел за счет влияния каждого фактора, мы использовали данные наблюдений летом и осенью 1969 г. практически в одной точке.

Расчет прироста фосфора и кремния осенью за счет увеличения глубины перемешивания и вследствие распада органического вещества и растворения створок диатомей даже при заведомо завышенной величине показал, что значительная часть прироста осенью не связана с этими причинами (Аржанова, 1971), а объясняется приростом, вероятно, усилением влияния южных вод, что подтверждается и другими авторами (Маслеников, 1972). Повторяемость ветров южных румбов в марте по сравнению с февралем увеличилась на 20%.

В 1971 г. в районе о-ва Южная Георгия исследования проводили зимой и весной. Весной по сравнению с зимним сезоном наблюдалось существенное уменьшение концентрации фосфора и кремния в поверхностном слое. Если зимой концентрация кремния в слое конвективного перемешивания нигде не была менее 500 мкг/л (колебания на большей части от 600 до 830 мкг/л), а фосфора составляла от 53 до 67 мкг/л, то весной она стала соответственно на большей части 60—500 мкг Si/л и 40—55 мкг P/л. Это связано с процессом фотосинтеза, что подтверждается (несмотря на увеличение весной температуры воды) ростом концентрации кислорода с 7,55—7,90 мл/л зимой до 8,10—9,16 мл/л весной, высоким насыщением воды кислородом весной (на большей части исследуемого района 108%, в ряде случаев до 114—116%), что может быть только результатом фотосинтетической деятельности фитопланктона (см. рис. 7, а).

Весной начался прогрев поверхностных вод и образование слоя летнего прогрева, который в период наших исследований был незна-

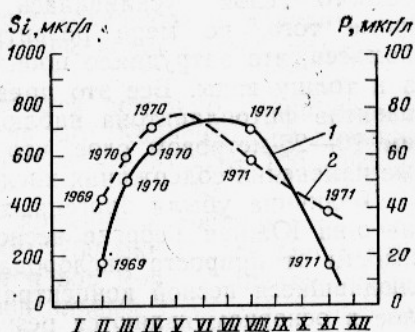


Рис. 8. Сезонный ход кремния и фосфора в районе о-ва Южная Георгия, мкг/л:

1 — кремний; 2 — фосфор.

чительным (10—25 м), но именно в этом слое наблюдалось весной максимальное изменение содержания биогенных элементов по сравнению с зимой. Пересыщение воды кислородом и уменьшение концентрации фосфора и кремния прослеживалось в гораздо большей толще воды — до 50—100 м. Мы предполагаем, что фотосинтез начался раньше прогрева вод, так как на развитие диатомового фитопланктона при остальных благоприятных условиях решающее влияние оказывает температура воды, а увеличение продолжительности светового дня. Пока не было вертикальной стратификации вод, обусловливаемой прогревом поверхностных вод, фитопланктон мог развиваться во всей толще воды, где было достаточно света. По мере прогревания поверхностного слоя усиливалась вертикальная стратификация вод. Кроме того, по мере развития фитопланктона увеличивалась его биомасса, что затрудняло проникновение достаточного количества света в толщу воды. Все это привело к тому, что наиболее интенсивное развитие фитопланктона наблюдалось в период исследования в верхнем 10—25-метровом слое, что и вызвало здесь наиболее существенные изменения содержания кислорода и биогенных элементов.

Величина убыли биогенных элементов в слое фотосинтеза в районе о-ва Южная Георгия весной в общем находится в прямой зависимости от прироста кислорода, поэтому мы можем считать, что наблюдавшиеся весной концентрации фосфора и кремния в фотическом слое в основном являются результатом фотосинтеза. Это подтверждается большой согласованностью между распределением фосфора, кремния и насыщением воды кислородом в слое фотосинтеза. Некоторое влияние оказывают северные воды, чему способствовали преобладающие в период наблюдений ветры северных румбов. Так как весной 1971 г. в водах, поступающих с севера, концентрация биогенных элементов была выше, чем в водах района о-ва Южная Георгия, где они интенсивно потреблялись фитопланктоном, результатом влияния этих вод было некоторое повышение содержания фосфора и кремния. К этому выводу мы пришли на основании того, что количество фосфора и кремния, на которое уменьшилась их концентрация в фотическом слое весной, несколько меньше того, которое должно было бы быть, если судить по приросту кислорода. Необходимо сказать, что хотя влияние северных вод и существует, весной 1971 г. оно не являлось фактором, определяющим в это время концентрации фосфора и кремния. Основную роль играет биохимический процесс — фотосинтез.

Итак, наряду с причинами, обычно обусловливающими сезонный ход биогенных элементов, в районе о-ва Южная Георгия прослеживается влияние южных или северных вод, которое не изменяет характер сезонного хода содержания фосфора и кремния, но сказывается на их абсолютных величинах, причем, если весной влияние северных вод незначительно изменяет концентрацию биогенных элементов, то осенью степень влияния южных вод, по всей вероятности, так велика, что наблюдаемое осенью увеличение концентрации этих элементов происходит в большой степени за счет этого фактора.

На юге моря Скотия исследования проводили лишь в феврале, марте и сентябре, поэтому, к сожалению, нельзя представить ход изменения содержания фосфора и кремния в течение всего года. Однако можно предположить, что сезонные изменения биогенных элементов выражены здесь гораздо слабее, чем в северных районах моря Скотия.

В литературе отмечено, что сезонное изменение концентрации кремния, например, может составить здесь около 50% (Clowes, 1938).

Мы таких изменений не наблюдали, вероятно, потому, что в южной части моря Скотия нам не пришлось работать ни в тот период, когда содержание биогенных элементов здесь было минимальным, ни в тот период, когда оно было максимальным. Те изменения, которые нам удалось обнаружить, составляли всего около 6% даже для кремния — элемента, концентрация которого наиболее подвержена колебаниям как в пространстве, так и во времени.

### Выводы

1. Основная закономерность горизонтального распределения фосфора и кремния в исследованном районе (увеличение их концентрации с севера на юг) обусловлена распределением водных масс, положением фронтальных зон.

2. Концентрация фосфора увеличивалась довольно равномерно с 20—50 мкг/л на севере до 60—65 мкг/л на юге. Концентрация кремния изменялась в относительно более широких пределах — от 100—250 до 2750—3000 мкг/л.

3. Резкое изменение концентрации кремния в районе вторичной фронтальной зоны (с 1250—1500 до 2250—2750 мкг/л), где происходит смешение вод Циркумполярного течения и вод моря Уэдделла, позволяет использовать максимальный горизонтальный градиент в распределении кремния в качестве критерия для выявления ее положения.

4. Содержание кремния и фосфора в антарктической поверхностной водной массе к началу вегетационного периода достаточно высоко для обеспечения интенсивного развития фитопланктона. Анализ отношения Si/P показал, что на большей части исследованной акватории во время вегетационного периода кремний может оказаться в количестве, лимитирующем развитие фитопланктона.

5. В отдельных, более ограниченных районах моря Скотия (район о-ва Южная Георгия, район Южных Оркнейских островов) распределение фосфора и кремния хорошо согласуется с динамикой вод, а во время вегетационного периода — с интенсивностью фотосинтеза.

6. Наиболее значительные межгодовые изменения фосфора и кремния в слое летнего прогрева отмечены в водах Циркумполярного течения и были связаны с изменением интенсивности биохимических процессов, а также с разной степенью влияния северных, более бедных биогенными элементами вод, или южных, более богатых ими.

7. Сезонные изменения кремния в районе о-ва Южная Георгия достигали 79%, фосфора — 59%; на юге моря Скотия, в водах моря Уэдделла эти изменения выражены гораздо слабее (для кремния, например, они составляли, по нашим наблюдениям, всего 6%).

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аржанова Н. В. Фосфор и кремний в поверхностных водах в районе о-ва Южная Георгия. — «Труды ВНИРО», 1971, т. 87, с. 16—27.

Богданов М. А., Солянкин Е. В. Изменчивость количества *Euphausia superba* Dana в районе о-ва Южная Георгия в связи с особенностями гидрологического режима. — «Океанология», 1970, вып. 4, с. 695—701.

Виноградов А. П. Химический состав организмов моря. — «Труды биохимической лаборатории АН СССР», 1944, ч. 3, вып. 6, с. 273 с.

Волковинский В. В. Основные факторы среды, лимитирующие уровень первичной продукции в океане. — В кн.: Методы рыбохозяйственных химико-океанографических исследований М., 1968, ч. 2, с. 135—154.

Елизаров А. А. Особенности динамики вод в местах массовых скоплений криля (*Euphausia superba* Dana). — «Труды ВНИРО», 1971, т. 79, с. 31—39.

Елизаров А. А. О гидрометеорологических условиях в море Скотия в феврале — марте 1968 г. — «Труды ВНИРО», 1969, т. 66, с. 63—72.

Канаева И. П. О количественном распределении планктона в море Скотия и прилежащих районах. — «Труды ВНИРО», 1969, т. 66, с. 168—176.

Масленников В. В. О водных массах моря Скотия. — «Труды ВНИРО», 1969, т. 66, с. 73—85.

Масленников В. В., Парфенович С. С., Солянкин Е. В. Исследования поверхностных течений моря Скотия. — «Труды ВНИРО», 1971, т. 79, с. 41—49.

Мовчан О. А. Состав и распределение фитопланктона в море Скотия и прилежащих водах в марте—апреле 1970 г. — «Труды ВНИРО», т. 84, 1973, с. 55—62.

Орадовский С. Г., Волковинский В. В., Ткаченко В. Н. Некоторые черты химии вод моря Скотия. — «Труды ВНИРО», 1969, т. 66, с. 109—128.

О фронтальной зоне моря Скотия. — «Океанология», 1969, вып. 6, с. 966—974.

Авт.: М. А. Богданов, С. Г. Орадовский, Е. В. Солянкин, Н. В. Хвацкий.

Солянкин Е. В. О динамике некоторых фронтальных зон Южной Атлантики. — «Труды ВНИРО», 1972, т. 75, с. 96—106.

Armstrong F. A. J. Phosphorus Chem. Oceanogr., v. 1, London—New-York, Acad. Press, 1965, p. 323—364.

Armstrong F. A. J. Silicon Chem. Oceanogr., v. 1, London—New-York, Acad. Press, 1965, p. 409—432.

Clowes A. J. Phosphate and silicate in the Southern Ocean. Discovery Rep, 19, 1, 1938, p. 1—120.

### Distribution, annual and seasonal fluctuations in the content of biogenic elements in the Sea of Scotia

N. V. Arzhanova

#### SUMMARY

Regularities of distribution of phosphorus and silicon in the layer of autumn-winter convective mixing and in the layer which is warmed up in the Sea of Scotia in summer are discussed. An attempt has been made to estimate the content of these biogenic elements available for phytoplankton. It is noted that prior to the vegetative period the concentrations of phosphorus and silicon are high enough for intensive development of phytoplankton everywhere. Annual fluctuations in the content of phosphorus and silicon and their causes are considered. The range of fluctuations is the widest in the waters of the Antarctic circumpolar current due to peculiarities of water advection in the Sea of Scotia and various photosynthetic intensity rates.

The observations on the seasonal content of biogenic elements show that the concentrations of silicon and phosphorus changed by 79% and 59% respectively, off South Georgia in the course of a year. Seasonal changes in the south part of the Sea of Scotia are less pronounced.