

УДК 551.464

ФОСФОР И КРЕМНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ  
В РАЙОНЕ О-ВА ЮЖНАЯ ГЕОРГИЯ

Н.В.Аржанова

Исследования, проведенные в районе Южной Георгии на НПС "Академик Книпович" в конце лета (февраль) и осенью (март, апрель) в 1965-1970 гг., позволили преследить пространственное распределение фосфора и кремния, межгодовые и межсезонные изменения их концентраций.

Как известно, в районе Южной Георгии по вертикали выделяются две водные массы - антарктическая поверхностная и глубинная теплая [7]. Антарктическая поверхностная водная масса распространяется в среднем до 200 м. Весной и летом в результате опреснения поверхностных слоев воды благодаря таянию льдов и их прогреву образуется верхний слой летнего прогрева, распространяющийся до глубин 25-75 м. Глубже располагается остаточный зимний холодный слой, имеющий примерно те же характеристики, что и вся поверхностная масса зимой. Наличие скачка плотности препятствует перемешиванию этих слоев. Перемешивание, как правило, происходит только в слое летнего прогрева, характеризующемся более или менее гомогенным распределением по вертикали всех характеристик. Осенью в результате охлаждения поверхностных вод начинается конвективное перемешивание, захватывающее более мощный, чем летом, слой.

В качестве основной характеристики использовались концентрации фосфора и кремния, осредненные для верхнего слоя антарктической водной массы, отделенной от лежащих ниже вод скачком плотности. Этот слой характеризуется более низким, чем глубже

лежащие слои, содержанием фосфора и кремния, что связано с потреблением их фитопланктоном в вегетационный период. Здесь же происходят и наиболее значительные пространственные и временные изменения концентрации биогенных элементов.

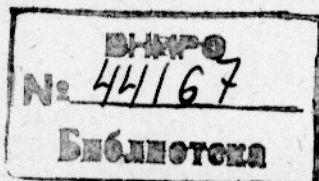
Горизонтальное распределение биогенных элементов в поверхностных водах определяется главным образом динамикой вод (рис. I-3).

Мы предполагаем, что наряду с динамикой вод пространственное распределение концентрации фосфора и кремния в море Скотия зависит от равной интенсивности фотосинтеза. Это обусловлено тем, что концентрация биогенных элементов в море Скотия 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.

Интенсивному развитию фитопланктона способствуют, по-видимому, повышенные концентрации микроэлементов: железа, марганца, молибдена [8, II]. Это относится прежде всего к прибрежным районам, которые обогащаются микроэлементами за счет их стока с суши.

Влияет, вероятно, на интенсивность фотосинтеза и динамика вод. По данным Елизарова [4], криль скапливается обычно в местах опускания вод. Справедливо было бы допустить, что и фитопланктон, более пассивный, чем криль, механически концентрируется в районах опускания вод. В результате этого здесь происходит интенсивнее потребление фосфора и кремния, приводящее к снижению их концентраций. Совпадение зон наиболее интенсивного потребления биогенных элементов в процессе жизнедеятельности фитопланктона с областями опускания вод еще больше подчеркивает связь горизонтального распределения фосфора и кремния с динамикой вод. Фотосинтез же влияет не на характер пространственного распределения биогенных элементов, а главным образом на их абсолютные величины.

На величине содержания фосфора и кремния в районе Южной Георгии может сказываться также влияние южных, более богатых биогенными элементами, вод моря Уэдделла или северных, более бедных, вод.



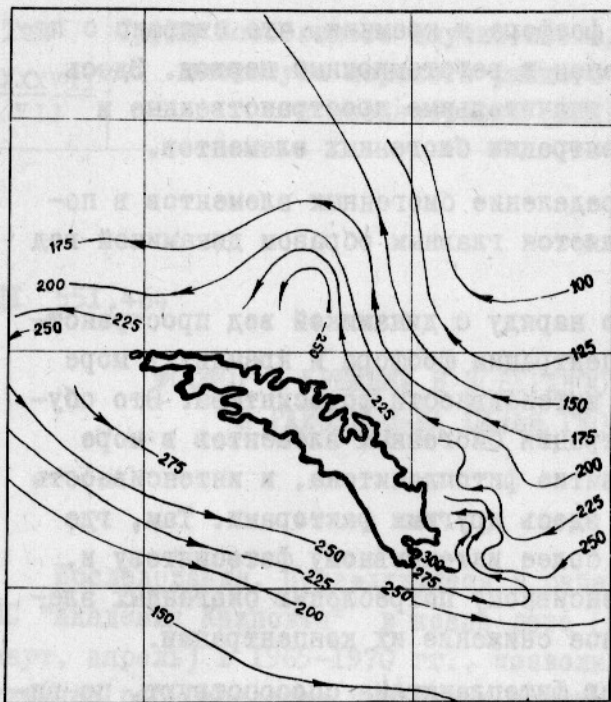


Рис.1.  
Карта динамической  
топографии в районе  
о-ва Южная Георгия  
в 1969 г. [6]

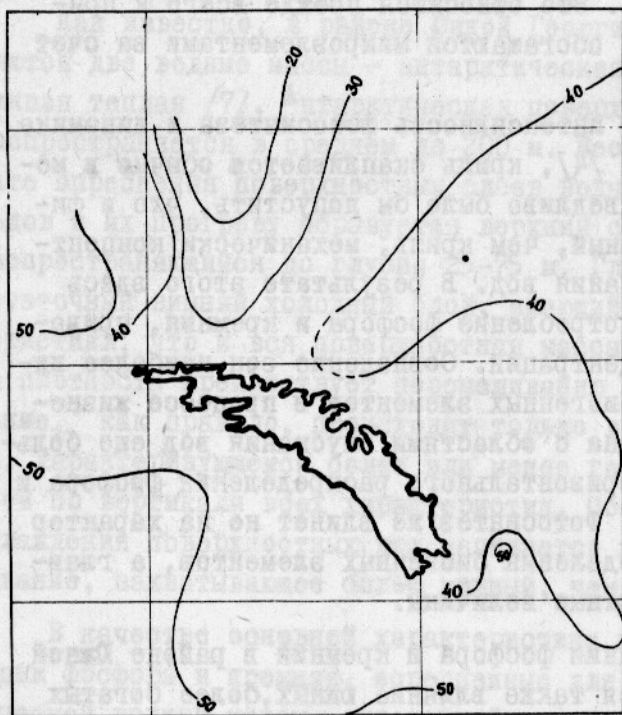
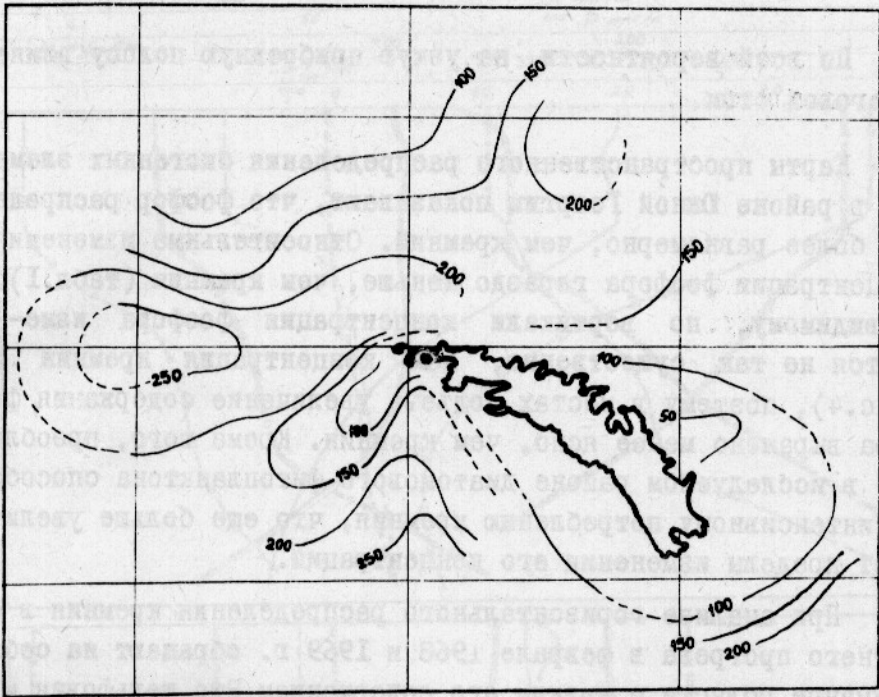


Рис.2.  
Пространственное рас-  
пределение фосфора  
(в мкг/л) в поверх-  
ностных водах  
(февраль 1969 г.)



А



Б

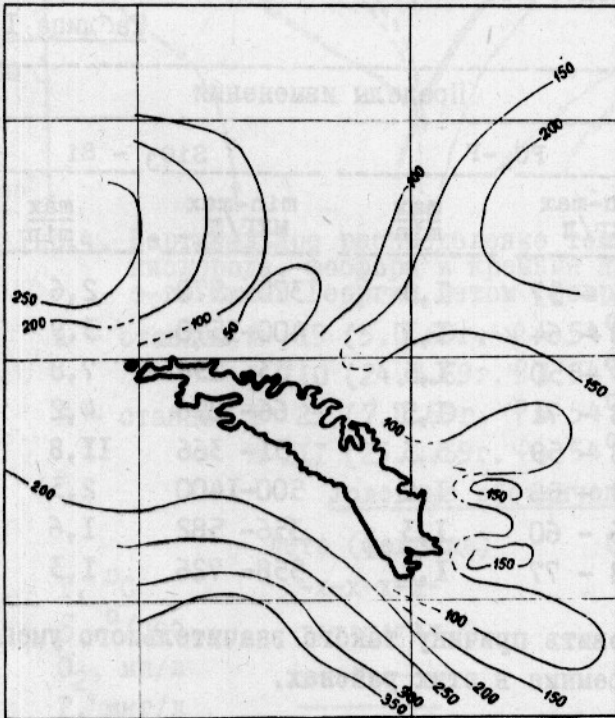


Рис.3.  
 Пространственное рас-  
 пределение кремния  
 (в мкг/л) в поверх-  
 ностных водах:  
 А - в феврале 1968г. ;  
 Б - в феврале 1969г.

По всей вероятности, на узкую прибрежную полосу влияет береговой сток.

Карты пространственного распределения биогенных элементов в районе Южной Георгии показывают, что фосфор распределен более равномерно, чем кремний. Относительные изменения концентрации фосфора гораздо меньше, чем кремния (табл. I). По-видимому, по вертикали концентрация фосфора изменяется не так существенно, как концентрация кремния (рис. 4), поэтому в местах подъема увеличение содержания фосфора выражено менее ясно, чем кремния. Кроме того, преобладание в исследуемом районе диатомового фитопланктона способствует интенсивному потреблению кремния, что еще больше увеличивает пределы изменения его концентраций.

При анализе горизонтального распределения кремния в слое летнего прогрева в феврале 1968 и 1969 г. обращают на себя внимание области с низким его содержанием. Это шельфовая и северо-западная области исследуемого района (см. рис. 3). Содержание кремния здесь менее 100 мкг/л.

Таблица I

Год	Месяц	Пределы изменения			
		PO <sub>4</sub> -P		SiO <sub>2</sub> - Si	
		min-max мкг/л	max min	min-max мкг/л	max min
1965	II	45 - 57	1,3	370- 970	2,6
1967	II	50 - 64	1,3	400-1570	3,9
1968	II	34 - 50	1,5	33- 296	7,8
	III	48 - 71	1,5	66- 276	4,2
1969	II	18 - 59	3,3	31- 366	11,8
	III	49 - 58	1,2	500-1400	2,3
1970	III	46 - 60	1,3	356- 582	1,6
	IV	68 - 77	1,1	558- 726	1,3

Попробуем установить причину такого значительного уменьшения концентрации кремния в этих районах.

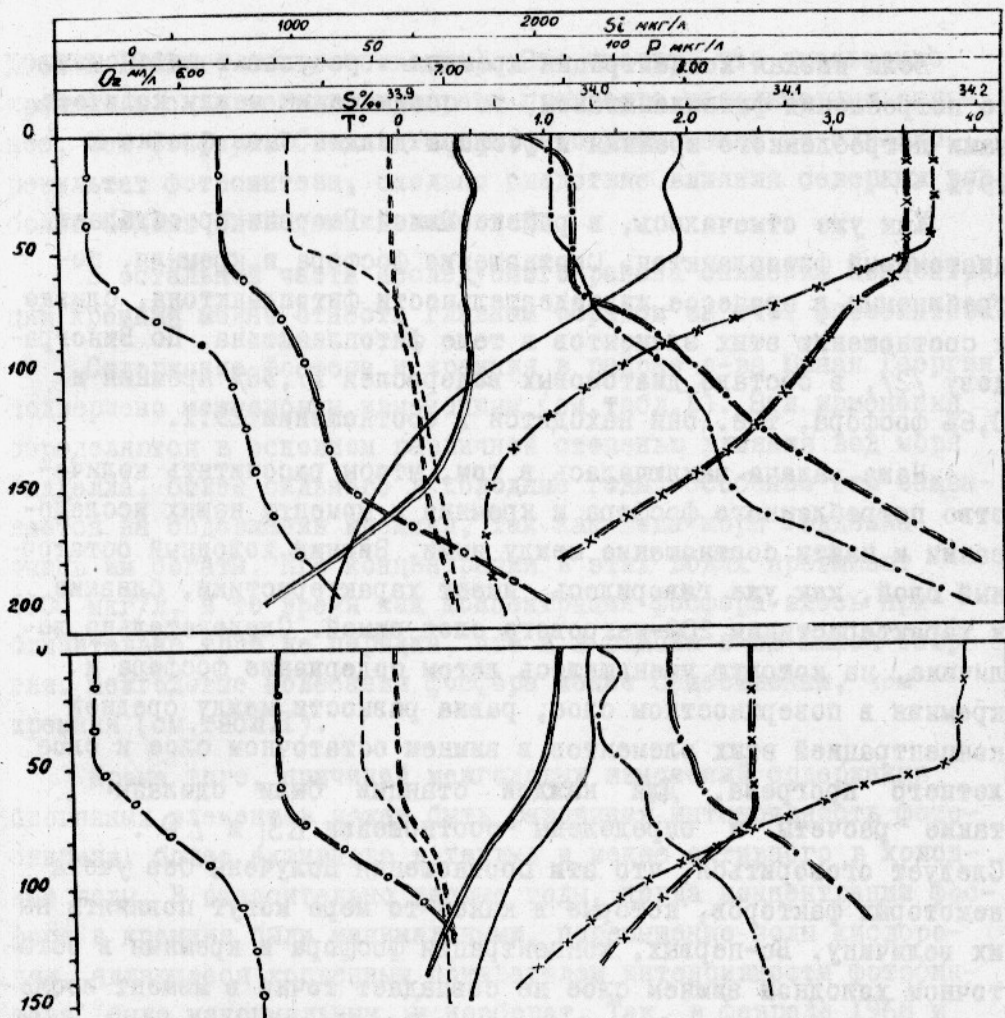


Рис.4. Вертикальное распределение температуры, солености, кислорода, фосфора и кремния к северо-востоку от о-ва Южная Георгия летом (Февраль) и осенью (март):

- А - станции № 15 (5.П.69г.  $\varphi = 54^{\circ}41'$ ;  $\lambda = 35^{\circ}10'$ ) и № 110 (24.И.69г.  $\varphi = 54^{\circ}41'$ ;  $\lambda = 35^{\circ}11'$ );  
 Б - станции № 25 (7.П.69г.  $\varphi = 54^{\circ}56'$ ;  $\lambda = 34^{\circ}26'$ ) и № 111 (25.И.69г.  $\varphi = 54^{\circ}57'$ ;  $\lambda = 34^{\circ}28'$ ).

Условные обозначения

	Лето (февраль)	Осень (март)
T, °C	-x-x-x-x-	=x=x=x=x=
S, ‰	-----	=••••••••
O <sub>2</sub> , мл/л	=====	=====
P, мкг/л	-----	=====
Si, мкг/л	-o-o-o-o-	=o=o=o=o=



Если низкая концентрация кремния - результат интенсивного потребления фитопланктоном, то соотношение между количествами потребленного кремния и фосфора должно быть близко к 29:1.

Как уже отмечалось, в районе Южной Георгии преобладает диатомовый фитопланктон. Соотношение фосфора и кремния, потребляемых в процессе жизнедеятельности фитопланктона, близко к соотношению этих элементов в теле фитопланктона. По Виноградову [2], в составе диатомовых водорослей 17,38% кремния и 0,6% фосфора, т.е. они находятся в соотношении 29:1.

Наша задача заключалась в том, чтобы рассчитать количество потребленного фосфора и кремния к моменту наших исследований и найти соотношение между ними. Зимний холодный остаточный слой, как уже говорилось, имеет характеристики, близкие к характеристикам 200-метрового слоя зимой. Следовательно, величина, на которую уменьшилось летом содержание фосфора и кремния в поверхностном слое, равна разности между средней концентрацией этих элементов в зимнем остаточном слое и слое летнего прогрева. Для каждой станции были сделаны такие расчеты и определены соотношения  $\Delta S_i$  и  $\Delta P$ . Следует оговориться, что эти соотношения получены без учета некоторых факторов, которые в какой-то мере могут повлиять на их величину. Во-первых, концентрация фосфора и кремния в остаточном холодном зимнем слое не совпадает точно в момент исследования с зимними характеристиками. Во-вторых, не учтена регенерация биогенных элементов. При анализе материала следует учесть также, что помимо диатомовых водорослей здесь встречаются перидиней, которые потребляют кремний и фосфор в гораздо меньших соотношениях, чем диатомовые ( $\Delta S_i/\Delta P = 4$  [2]) и другие водоросли.

В шельфовой области порядок величин  $\Delta S_i/\Delta P$  таков, что наблюдаемые здесь небольшие концентрации кремния можно считать в основном результатом фотосинтеза. Для районов с концентрацией кремния менее 100 мкг/л отношение средних величин  $\Delta S_i/\Delta P$  в шельфовой области составляло 44 и 22 (в феврале соответственно 1968 и 1969 г.); в северо-западном районе - 480 (февраль 1968 г.). Для районов с концентрацией кремния 100-250 мкг/л это соотношение составляло 32 и 39 (в феврале

1968 и 1969 г. соответственно). Это значит, что уменьшение кремния в слое летнего прогрева произошло несоизмеримо сильнее, чем фосфора. Следовательно, это уменьшение не столько результат фотосинтеза, сколько следствие влияния северных вод, более бедных биогенными элементами.

В остальной части исследуемого района снижение концентрации кремния можно отнести главным образом за счет фотосинтеза.

Содержание фосфора и кремния в районе о-ва Южная Георгия подвержено межгодовым изменениям (см. табл. I). Эти изменения определяются в основном различной степенью влияния вод моря Уэдделла, более сильного в холодные годы. Особенно это сказывается на содержании кремния, так как воды моря Уэдделла очень им богаты. Его концентрация в этих водах превышает 1000 мг/л, в то время как концентрация фосфора здесь приблизительно того же порядка, что и в районе о-ва Южная Георгия. Межгодовые колебания фосфора менее существенны, чем кремния (см. табл. I).

Кроме того, причиной межгодовых изменений содержания биогенных элементов может быть различная интенсивность фотосинтеза, более активного в теплые и менее активного в холодные годы. В относительно теплые годы, когда концентрации фосфора и кремния были минимальными, пересыщение воды кислородом, являющееся косвенным показателем интенсивности фотосинтеза, было максимальным, и наоборот. Так, в феврале 1968 и 1969 г. пересыщение воды кислородом достигало 0,6-0,9 мл/л, в то время, как в 1965 г. оно не превышало 0,2, а в 1967 г. - 0,15 мл/л.

Сезонные изменения фосфора и кремния в районе Южной Георгии были отмечены более тридцати лет назад [9]. Благодаря съемкам, проведенным к северо-востоку от о-ва Южная Георгия в феврале 1968 и 1969 г. и в марте 1970 г. и повторенным в том же районе в марте 1968 и 1969 г. и в апреле 1970 г., мы имели возможность проследить изменение концентрации фосфора и кремния от лета к осени. Осенью (март, апрель) концентрация биогенных элементов была выше, чем летом (февраль) (см. табл. I).



Мы попытались подсчитать, какой прирест фосфора и кремния произошел за счет каждого фактора, вызывающего осенью увеличение концентраций биогенных элементов. Для этого использовали данные наблюдений, проведенных летом и осенью 1969 г. практически в одной точке:  $\varphi = 54^{\circ}41'$ ;  $\lambda = 35^{\circ}10'$  (станции № 15, февраль, и № 110, март; № 25, февраль, и № III, март).

В марте 1969 г. в исследуемом районе начинается осенне-зимнее охлаждение [6]. Вследствие этого, а возможно, и в результате ветровой деятельности осенью глубина перемешивания вод увеличивается. Это приводит к повышению концентраций биогенных элементов в поверхностных слоях. Сравнение вертикального распределения температуры и солености в феврале и марте показало, что летом глубина перемешивания вод в обоих районах не превышала 50 м, а осенью увеличилась до 60 м на ст. 110 и до 75 м на ст. III (см. рис. 4). Чтобы определить, насколько изменились характеристики за счет увеличения глубины перемешивания, допустим, что и летом на ст. 15 и 25 произошло перемешивание вод соответственно до глубин 60 и 75 м. Рассчитав средние величины исследуемых элементов в слоях воды 0-60 м (ст. 15) и 0-75 м (ст. 25) и сравнив их с соответствующими величинами в слое 0-50 м, мы определили изменение этих элементов за счет увеличения глубины перемешивания (табл. 2).

Увеличению концентрации биогенных элементов осенью способствует также угасание, а затем прекращение фотосинтеза, отмирание и распад фитопланктона, т.е. окисление органического вещества, частичное растворение створок диатомовых.

При расчете прироста биогенных элементов в результате распада вещества фитопланктона мы основывались на изменении концентрации кислорода от лета к осени. Осенью наблюдалось уменьшение кислорода (см. рис. 4), являющееся результатом увеличения глубины перемешивания вод и потребления его в процессе распада органического вещества. Учтя уменьшение кислорода за счет увеличения глубины перемешивания (см. табл. 2), мы определили количество кислорода, потребленное на окисление органического вещества. Мы предполагаем, что ошибка, которая возникает вследствие эвазии и инвазии кислорода, не изменит существенно рассчитанную величину, так как мы пользовались средними концентрациями кислорода для целого слоя.

Таблица 2

Изменение концентрации	Станции					
	№ 15 <sup>x/</sup> , 110 <sup>xx/</sup>			№ 25 <sup>xxx/</sup> , 111 <sup>xxxx/</sup>		
	O <sub>2</sub> мл/л	P мкг/л	Si мкг/л	O <sub>2</sub> мл/л	P мкг/л	Si мкг/л
Летом	7,95	33	130	7,58	45	120
Осенью	7,08	53	692	7,37	53	948
За счет увеличения глубины перемеши- вания ( $\Delta_1$ )	0,00	I	4	-0,03	I	42
За счет распада массы фитопланкто- на ( $\Delta_2$ )	-0,87	10	347	-0,18	2	72
$\Delta_1 + \Delta_2$	-0,87	II	351	-0,21	3	114
От лета к осени ( $\Delta_3$ )	-0,87	20	562	-0,21	8	828
$\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_3} \cdot 100\%$	100	55	62	100	38	14

$x/$  5.П.69:  $\varphi = 54^{\circ}41'$ ;  $\lambda = 35^{\circ}10'$ ;  
 $xx/$  24.Ш.69:  $\varphi = 54^{\circ}41'$ ;  $\lambda = 35^{\circ}11'$ .  
 $xxx/$  7.П.69:  $\varphi = 54^{\circ}56'$ ;  $\lambda = 34^{\circ}26'$ ;  
 $xxxx/$  25.Ш.69:  $\varphi = 54^{\circ}57'$ ;  $\lambda = 34^{\circ}28'$ .

Зная количество кислорода, потребленного на окисление органического вещества, мы можем определить количество фитопланктона, подвергшегося окислению, и соответствующие ему количества фосфора и кремния. Как известно, I мл кислорода эквивалентен 0,4287 мг С [1]. Используя данные Виноградова [2] о химическом составе диатомового фитопланктона, мы рассчитали, что I мл O<sub>2</sub> соответствует 2,29 мг массы диатомового фитопланктона (в сухом весе), II,6 мкг фосфора, 399 мкг кремния. Справедливость наших расчетов подтверждается данными других авторов [10, 13].

Используя полученные коэффициенты, мы нашли величину прироста фосфора и кремния за счет распада органического вещества фитопланктона и растворения его панциря. Правда, эти

величины несколько завышены, так как в действительности не все количество фосфора и кремния, входящее в состав тела фитопланктона, переходит в растворенное состояние. Это связано с тем, что при температурах, свойственных поверхностным водам исследуемого района ( $2-3^{\circ}\text{C}$ ), скорость регенерации очень мала. При этом кремний, из которого фитопланктон строит свой скелет, растворяется частично. В панцирях диатомовых водорослей кремнезем находится в легко- и трудногидролизуемых формах, которым присущи различные скорости растворимости [5]. Количество кремния, перешедшее в раствор из створок диатомовых, зависит от многих причин: структуры кремневого панциря, его мощности, температуры [3], величины pH [12]. Козлова [5] отмечает, что условия температуры и pH в антарктических водах не благоприятствуют полной растворимости оболочек диатомей. Кроме того, существуют целые группы диатомовых водорослей, створки которых, почти не растворяясь, опускаются на дно.

Мы не стремились точно подсчитать количество растворенного фосфора и кремния. Для нас было важно, что полученные величины завышены.

Анализ (см. табл. 2) показал, что содержание фосфора и кремния в результате увеличения глубины перемешивания изменилось незначительно.

Гораздо более ощутимый прирост этих элементов произошел вследствие окисления органического вещества и растворения панциря диатомовых водорослей.

Казалось бы, сумма прироста за счет увеличения глубины перемешивания и распада массы фитопланктона должна быть близка к наблюдаемому фактическому приросту. Однако это не так. Даже при заведомо завышенных расчетных величинах прироста в результате распада массы фитопланктона эта сумма гораздо ниже фактически наблюдаемого прироста фосфора и кремния. В районе ст. 15, IIО она составила по фосфору 55%, по кремнию - 62%, а в районе ст. 25, III - соответственно 38% и 14% от общего прироста. Из этого следует, что значительная часть прироста фосфора и кремния осенью 1969 г. не была связана с увеличением глубины перемешивания и распадом массы фитопланктона, а объясняется другой причиной. Мы предполагаем, что этой при-



чиной является усиление осенью влияния вод моря Уэдделла, что подтверждается и гидрологическими исследованиями [6]. Это обстоятельство объясняет и более резкие колебания концентрации кремния по сравнению с колебаниями концентрации фосфора от лета к осени.

В заключение следует отметить, что соображения, изложенные в статье, не являются неоспоримыми и окончательными, так как все материалы, которые были в нашем распоряжении, только косвенно характеризуют разбираемые процессы. В дальнейшем предполагается уточнение и разработка методов анализа имеющегося материала с привлечением новых данных.

### Л и т е р а т у р а

1. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск, изд-во АН БССР, 1960.
2. Виноградов А.П. Химический элементарный состав организмов моря. Труды Биогеохим. лаб. АН СССР. Ч.3. Вып.6, 1944.
3. Горюнова С.В. Некоторые закономерности развития и распада планктонных форм водорослей в дальневосточных морях. Труды Океаногр.комиссии. Т.3, 1958.
4. Елизаров А.А. Особенности динамики вод в местах скопления криля. Труды ВНИРО. Т. LXXIX, 1971.
5. Козлова О.Г. Диатомовые водоросли индийского и тихоокеанского секторов антарктики. М., изд-во "Наука", 1964.
6. Масленников В.В. О влиянии динамики вод на распределение *Euphausia superba* Dana в районе о-ва Южная Георгия. Труды ВНИРО. Т. LXXIII, 1970.
7. Масленников В.В. О водных массах моря Скотия. Труды ВНИРО. Т. LXVI, М., 1969.
8. Орадовский С.Г., Волковинский В.В., Ткаченко В.Н. Некоторые черты химии вод моря Скотия. Труды ВНИРО. Т. LXVI, М., 1969.
9. Clowes, A.J. Discovery Rep. 19,1, 1938. Phosphate and silicate in the Southern Ocean.
10. Fleming, R.H. Composition of plankton and units for reporting populations and production. Proc. Sixth. Pacific Sea Congress.
11. Hart, T.I. Phytoplankton periodicity in Antarctic surface waters. Discovery Reports. Vol. XXI, 1942.

12. Lewin, J.C. The dissolution of silica from diatoms walls. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v.21, No.3/4, 1961.
13. Redfield, A.C. The processes determining the concentration of oxygen, phosphate and other organic derivatives within the depth of the Atlantic Ocean. *Pap. Phys. Oceanogr. Meteor.*, 9, N 2, 1942.

**The phosphorus and silicon contents in the surface waters off South Georgia.**

N.V.Arzhanova

**S u m m a r y**

The distribution pattern of phosphorus and silicon in the surface waters off South Georgia is mostly governed by the water dynamics. The absolute values of the phosphorus and silicon contents are referred to the consumption of biogenic elements by phytoplankton to maintain the life activity as well as to the influence of poor northern waters or southern waters rich in biogenic elements.

Year-to-year and seasonal fluctuations in the phosphorus and silicon contents may be referred, on the main, to a various degree of influence on the part of the Weddell Sea waters. Besides, the intensity of photosynthesis is also of importance.