

## PARTICULARIDADES DE LA CIRCULACION VERTICAL DE LAS AGUAS EN EL ATLANTICO SUDOCCIDENTAL. CARACTERISTICAS DE LA PICNOCLINA Y LA BIOPRODUCTIVIDAD<sup>1</sup>

D. N. Severov

All Union Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (VNIRO)  
17, V. Krasnoselskaya, Moscow, B-140, U.R.S.S.

**RESUMEN:** Se analiza un complejo de factores abióticos para el Atlántico Sudoccidental que incluye los siguientes parámetros: las características de las zonas frontales, la convergencia de corrientes, la información sobre la situación de zonas de afloramiento intenso, el avance y propagación por la plataforma de aguas diluidas de la descarga continental, los valores de oxígeno disuelto y fosfatos y la situación de focos de acumulación advectiva de estas sustancias a cuenta de corrientes horizontales y verticales, así como las características de profundidad e intensidad de la picnoclina y la información sobre la situación de zonas con valores altos de producción primaria y biomasa de plancton. Esto sirve como fundamento para determinar por medio del análisis multifactorial, las zonas de plataforma y de talud donde se observaba coincidencia espacial entre los factores abióticos estudiados.

En la plataforma (0-200 m) se separan cuatro zonas: zona del Río de la Plata (35°-39°S; 53°-57°W); zona de Mar del Plata - Golfo San Jorge (40°-46°S; 56°-66°W); zona sudoccidental (al noreste de la Isla Tierra del Fuego, 52°-55°S; 63°-66°W) y zona nórdica y noroccidental de la plataforma de las Islas Malvinas (49°-51°S; 60°-64°W).

Estas zonas se distinguen por la presencia o ausencia de bioproduktividades elevadas, intensidades de corrientes convergentes y magnitudes de gradientes horizontales.

En la parte nórdica de la plataforma, en la convergencia subtropical, los gradientes de temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y fosfatos son máximos; en la parte central de plataforma, en el frente secundario subantártico, están expresados en mayor grado los gradientes horizontales de temperatura; en la parte sudoccidental de plataforma predominan los gradientes horizontales de salinidad y oxígeno disuelto y al noroeste y al norte de las Islas Malvinas los gradientes de densidad, salinidad y fosfatos. La zona sudoccidental se distingue de otras por los valores altos de velocidad vertical de las corrientes e intensidad de afloramiento en la capa desde 200 m hacia la superficie y la zona al norte de las Islas Malvinas por la presencia de focos de acumulación de oxígeno y fosfatos cerca del fondo (150-200 m).

En el talud continental (0-1000 m) se observa la coincidencia espacial de zonas de convergencia de corrientes en los horizontes superficiales, intermedios y/o profundos, zonas con valores altos de gradientes de características oceanológicas, zonas de afloramientos de la capa de fotosíntesis, tramos con valores máximos de intensidad de la picnoclina y valores mínimos de su profundidad, zonas con valores altos de oxígeno disuelto (más de 6,0 ml/l) y fosfatos (1-3 mg-at P/l) desde la superficie hasta las capas de profundidad (500-1000 m) y zonas de acumulación de oxígeno y fosfatos en la capa fótica (150 m) y en la pelagial (500 m). Según los indicios coincidentes en cada zona se separaron: la parte nórdica de talud (34°-37°S), la parte central de talud (43°-47°S), el talud nórdico de las Islas Malvinas (49°-50°S; 57°-60°W) y el talud sudoriental de las Islas Malvinas (51°-54°S; 54°-60°W).

A diferencia de las zonas de plataforma, para las cuales el principal factor abiótico es la presencia de convergencias de corrientes, las zonas de grandes profundidades fuera del talud se caracterizan por: convergencia de corrientes, afloramientos que alcanzan la superficie y zonas de acumulación de oxígeno, fosfatos en grandes profundidades y en la capa superficial por encima de éstas.

**Palabras clave:** Condiciones oceanológicas, picnoclina, bioproduktividad, Atlántico Sudoccidental.

**SUMMARY: CHARACTERISTICS OF THE VERTICAL CIRCULATION OF THE WATERS IN THE SOUTHWESTERN ATLANTIC. CHARACTERISTICS OF THE PICNOCLINA AND THE BIOPRODUCTIVITY.**—A complex of biotic factors is analyzed for the Southwestern Atlantic. The following parameters have been included: characteristics of the frontal areas; stream convergence; information on the situation of strongly outcrop areas, advance and spreading of diluted waters from the continent throughout the platform; values of dissolved oxygen and phosphates; situation of advective accumulative focuses from those substances due to horizontal and vertical streams; depth and intensity characteristics of the picnoclina; information on the situation of areas with high values of primary production and plancton biomass. This is the basis for determining, by means of the multifactorial analysis, platform and slope areas, spatial coincidence being observed among abiotic factors under observation.

There are four areas in the platform (0-200 m): area of Río de la Plata (35°-39°S; 53°-57°W); area of Mar del Plata-Gulf of San Jorge (40°-46°S; 56°-66°W), southwestern area (northeast of Tierra del Fuego Island (52°-55°S; 63°-66°W) and northern and northwestern area of the platform of Islas Malvinas (49°-51°S; 60°-64°W).

These areas are distinguished by the presence or absence of high bioproduktivities, intensity of convergent streams and magnitudes of horizontal gradients.

To the northern area of the platform, in the subtropical convergence, temperature gradients such as salinity, density, dissolved oxygen and phosphates, run the highest.

To the central part of the platform, in the subantarctic secondary front, horizontal gradients of temperature are shown to a higher degree.

Horizontal gradients of salinity and dissolved oxygen prevail in the southwestern part of the platform. To the north of Islas Malvinas prevail the gradients of density, salinity and phosphates.

The southwestern area is distinguished from others by the high values of the streams' vertical speed and by the outcropping intensity in the layer from 200 m to the surface.

The northern area of Islas Malvinas is distinguished by the presence of focuses of oxygen and phosphate accumulation near the bottom.

In the continental slope the following can be observed: spatial coincidence of stream convergence areas on superficial horizons, intermediate and/or deep; areas with high values of gradients with oceanological characteristics; areas with photosynthesis outcropping; stretches with the highest values of picnoclina intensity and minimum values of its depth; areas with high values of dissolved oxygen (more than 6.0 ml/l) and phosphates (1-3 mg-at P/l) from the surface to the layers of depth (500-1000 m); areas of phosphate and oxygen accumulation on both the fotio and pelagial layers (150 m).

<sup>1</sup> Este trabajo fue presentado en el Sexto Simposio Científico de la CTMFM, diciembre de 1989.

According to the coincident signs in each area, there are: the slope northern part (34°-37°S); the slope central part (43°-47°S); the northern slope of Islas Malvinas (49°-50°S and 57°- 60°W) and the southwestern slope of Islas Malvinas (51°-54°S; 54°-60°W).

Unlike the platform areas for which the principal abiotic factor is the presence of stream convergences, the areas of big depths outside the slope have the following characteristics: stream convergences; outcropping which reach the surface and areas of oxygen accumulation; phosphates in big depths and on top of the superficial layer.

**Key words:** Oceanological conditions, picnoclin, bioproductivity, Southwestern Atlantic.

## INTRODUCCION

Diversos autores se han dedicado al análisis de la dinámica de aguas en el Atlántico Sudoccidental. Wüst (1957) analizó la distribución de las masas intermedias de agua con valores bajos de salinidad de la convergencia antártica; Defant (1961) y Svérdrup (1939, 1942) estudiaron las propiedades de la circulación de aguas en el Atlántico Sur; Klovs (1958) analizó la capa isopícnica; Reili (1959) estudió el traslado y la distribución de salinidad, oxígeno disuelto, fosfatos y nitratos a lo largo de las capas isopínicas; Martineau (1953) realizó un análisis de la influencia del sistema de corrientes y la mezcla lateral sobre las aguas intermedias antárticas; Garner *et al.* (1962) calculó el volumen de aguas trasladadas por la circulación ventosa a la deriva en el Océano Atlántico; Taff (1963) estudió la distribución de la profundidad, salinidad oxígeno a lo largo de las superficies de la anomalía estérica potencial continua y Reid (1977) comparó el movimiento de aguas intermedias en los Océanos Atlántico y Pacífico.

Varios científicos argentinos dedicaron sus trabajos al estudio de las corrientes del área, entre ellos se puede citar a Boltovskoy (1970), Balech (1965), Lusquifios y Valdés (1971) y Buscaglia (1971).

Los resultados del cálculo completo de las corrientes horizontales del Atlántico Sudoccidental según el modelo de Eckman se citan en los trabajos de Zyrianov y Severov (1979) y de Zyrianov (1980).

El presente trabajo está dedicado al análisis de resultados del cálculo del integrante vertical de corrientes según el modelo de Eckman citado.

## MATERIAL Y METODOS

El modelo de cálculo utilizado así como el esquema numérico, se describen detalladamente en el trabajo de Zyrianov (1980). Aquí se citará sólo la ecuación de partida. El cálculo de las corrientes se realizó dentro del marco del modelo sintetizado de Eckman del océano baroclínico. Esto significa que el movimiento se considera como aceleración de la masa establecida, indivergente, no lineal, comparada con la aceleración de coriolis. Asimismo, se considera sólo el cambio vertical turbulento por la cantidad de movimiento:

$$A \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2} + \Omega \vec{k} \times \vec{v} = g \nabla \left( -\xi + \frac{1}{\rho_H} \int \rho' dz \right) \quad (1)$$

$$(\nabla \cdot \vec{v}) + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

donde  $A = 200 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$  es el coeficiente del cambio vertical turbulento por la cantidad de movimiento;  $\vec{v} = (\mu, \nu)$  es el vector de la velocidad horizontal de la corriente;  $\Omega$  es el parámetro de Coriolis;  $\vec{k} = (0, 0, 1)$  es el vector unitario dirigido verticalmente abajo;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $\nabla = (\partial/\partial y, \partial/\partial x)$  es el vector hamiltoniano;  $\xi$  es la elevación de la superficie libre;  $\rho_H$  es la densidad de agua promedio en la capa del fondo;  $\rho' = (\rho - \rho_H)$  es la anomalía de la densidad y  $\omega$  es el componente vertical de la velocidad.

El eje  $y$  está dirigido al norte,  $x$  al este,  $z$  verticalmente abajo.

Se plantea la condición de ausencia del viento en la superficie del océano  $\partial v / \partial z = 0$ , en el fondo ( $z = H(x, y)$ ) se acepta la condición de adhesión. La condición de ausencia del viento en la superficie del océano en tales cálculos diagnósticos significa que en el modelo no se considera la capa superficial de Eckman. Sin embargo, la influencia del viento existe en el cálculo aunque no evidentemente, ya que el mismo se realiza promediando el campo de densidad por muchos años y promediando por estación. Las ecuaciones (1) y (2) se reducen a la solución de la ecuación elíptica para la función de flujos enteros:

$$\frac{\Omega}{2aI^2} \Delta \psi - I \left( \psi, \frac{\Omega}{H} \right) = \text{div} \left[ \left( \frac{\Omega}{H} \right) \vec{S}^* \right] \quad (3)$$

donde  $a = (\Omega/2A)^{1/2}$  es el parámetro de Eckman;  $\Delta$  es un operador laplaciano bidimensional e  $I$  es un jacobiano de dos funciones.

Los componentes del vector  $\vec{S}^*$  así como la conexión de pendientes del nivel  $\partial \xi / \partial x$  y  $\partial \xi / \partial y$  con componentes del vector  $\vec{S}^*$  y función de flujos enteros  $\psi$  se expresan con las proporciones siguientes:

$$\vec{S}^* = \frac{g}{\Omega \rho_H} (\vec{k} \times \vec{v}) \int_0^H (H-z) \rho' dz + \frac{g}{2\Omega \rho_H a} \int_0^H M(\nabla \rho') dz \quad (4)$$

$$\nabla \xi = \frac{\Omega}{gH} \left[ \left( \psi - \frac{1}{2aH} \vec{S}^* \right) + \vec{k} \times \left( \vec{S}^* - \frac{1}{2aH} \nabla \psi \right) \right] \quad (5)$$

donde M es una matriz.

Los paralelos 34°30' y 55°30' sirvieron de límites externos norte y sur respectivamente del área y como límites meridionales los 48°30' en el este y la isobata de 25 metros en el oeste.

En partes del límite externo se observaron gastos geostroficados:

La puesta en (6) en calidad de limite superior de integración de la profundidad real del océano H(x, y) da

$$\frac{\psi}{r_0} - \frac{g}{\Omega \rho_H} \int_0^{\bar{H}} z \rho' dz \quad (6)$$

resultados aceptables sólo para el océano profundo con gradientes pequeños del relieve del fondo. Debido a que el área de estudio abarca la plataforma, el talud continental brusco y el lecho oceánico, la aplicación de la fórmula (6) con  $H = H(x, y)$  no sólo da resultados insatisfactorios, sino que lleva a interpretar erróneamente la función  $\psi$  en el límite.

Además, al acercarse a aguas someras el cambio de la profundidad del océano ejerce influencia en la conducta del integral (6) en total, independientemente del carácter de la modificación de la función subintegral. Por eso, para hallar gastos en partes líquidas del límite se utilizó la fórmula (6) en la aproximación del océano con el fondo horizontal que se encontraba en la profundidad máxima del área estudiada o sea:  $\bar{H} = \max H(x, y)$ , que constituía 6,3 km. En el tramo  $[H(x, y), \bar{H}]$  se daba el decrecimiento lineal de anomalía de densidad  $\rho'(z)$  desde  $\rho'(H)$  hasta cero. La fórmula (5) toma el aspecto definitivo:

$$\frac{\psi}{r_0} - \frac{g}{\Omega \rho_H} \left[ \int_0^{H(x,y)} z \rho' dz + \int_0^{\bar{H}} z(z - \bar{H}) dz \right] \quad (7)$$

donde  $H = 6,3$  km.

En el contorno interno de forma rectangular ( $r_1$ ) aproximado a las Islas Malvinas, la función de flujos enteros debe ser igual a la constante C que se busca en la condición integral:

$$\oint_{r_1} \frac{1}{2aH} \frac{\partial \psi}{\partial \vec{n}} dS = \oint_{r_1} (\vec{S}^* \cdot \vec{n}) dS \quad (8)$$

donde el vector n es la normal externa al contorno  $r_1$ .

La solución de la ecuación (3) con las condiciones de (7) y (8) se obtiene en forma de  $\psi = \psi_0 + C \psi_1$  utilizando el esquema numérico de las diferencias dirigidas y el método de discrepancias mínimas. Al haber encontrado la función de flujos enteros, las velocidades de corriente se calculan fácilmente en cualquier horizonte por las fórmulas:

$$\Omega v = g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho_H} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^z \rho' dz \quad (9)$$

$$-\Omega u = \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho_H} \frac{\partial}{\partial y} \int_0^z \rho' dz \quad (10)$$

$$\omega = \frac{\partial \Omega}{\partial y} \left[ \frac{z}{\Omega} v - \frac{g}{\Omega^2 \rho_H} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^z z \rho' dz \right] \quad (11)$$

Las fórmulas (9, 10 y 11) son válidas sólo fuera de las capas superior e inferior de fricción.

Para los cálculos se utilizaron campos de densidad promedio de muchos años para el verano y el invierno del hemisferio austral en los horizontes estándar de 0 a 6000 m obtenidos en campañas de investigación realizadas en los últimos 75 años. Para el relieve del fondo se utilizaron cartas de navegación de las cuales se obtuvieron promedios consecutivos. Se analizaron magnitudes de densidad de agua por cuadrados de un grado así como cartas de flujos enteros y campos de velocidades de las corrientes horizontales en los horizontes de 0, 100, 500 y 3000 m (Severov, 1987).

## RESULTADOS OBTENIDOS

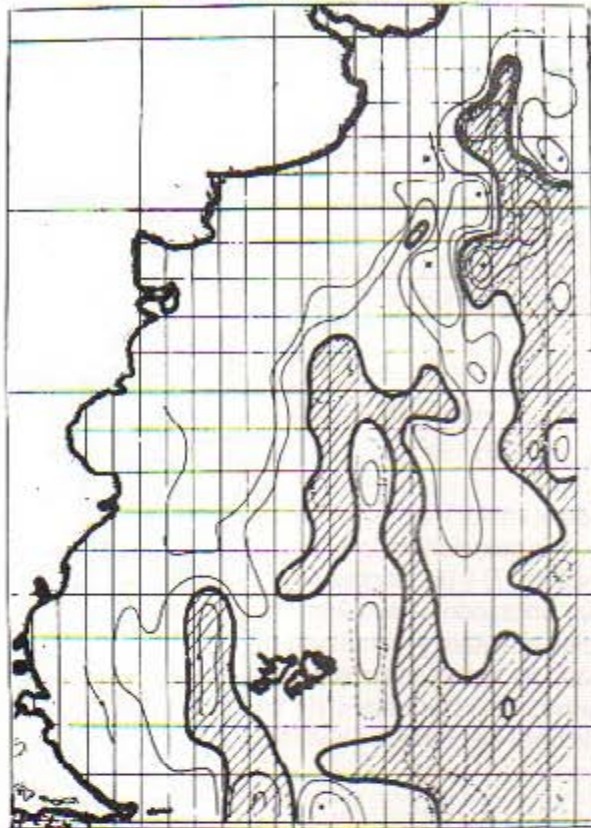


Fig. 1. Corrientes verticales en el horizonte de 25 m (invierno)

Los resultados del cálculo según el modelo presentado en la componente vertical de corrientes



Fig. 3. Corrientes verticales en el horizonte de 500 m (invierno).



Fig. 2. Corrientes verticales en el horizonte de 100 m (invierno).

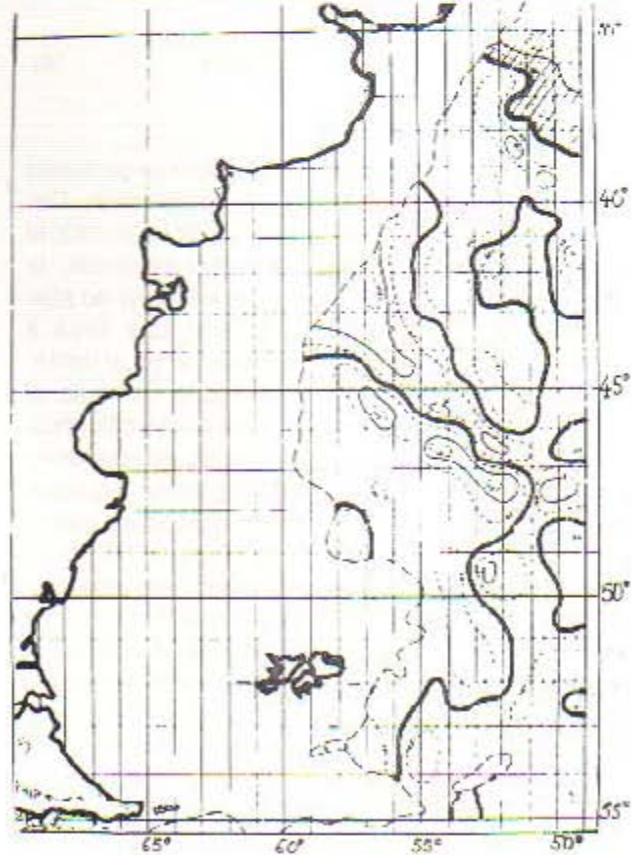


Fig. 4. Corrientes verticales en el horizonte de 1000 m (invierno).

de los horizontes de 25, 100, 500 y 1000 m se citan por primera vez y aparecen en las Figuras 1 a 8.

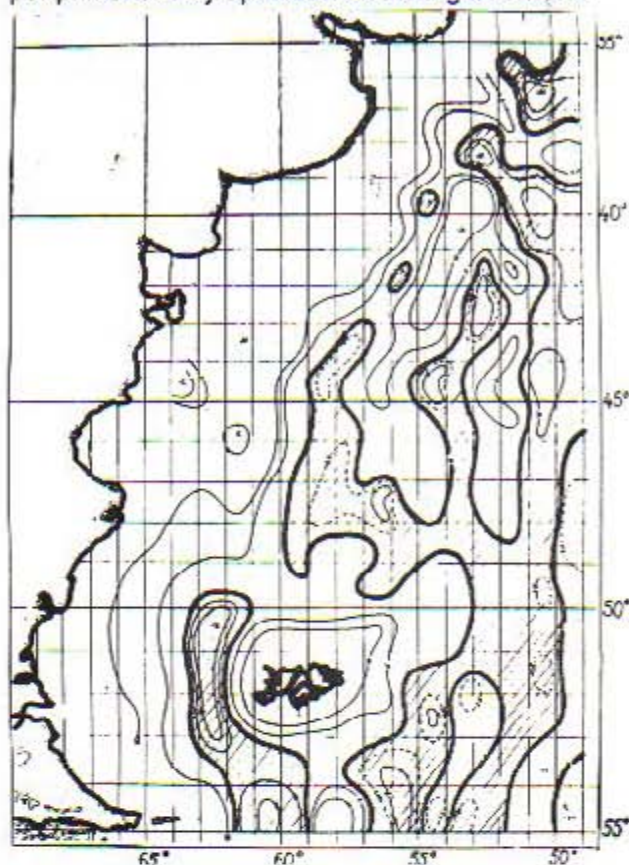


Fig. 5. Corrientes verticales en el horizonte de 25 m (verano).

La circulación vertical de aguas, especialmente en las zonas de afloramiento estable y a lo largo de

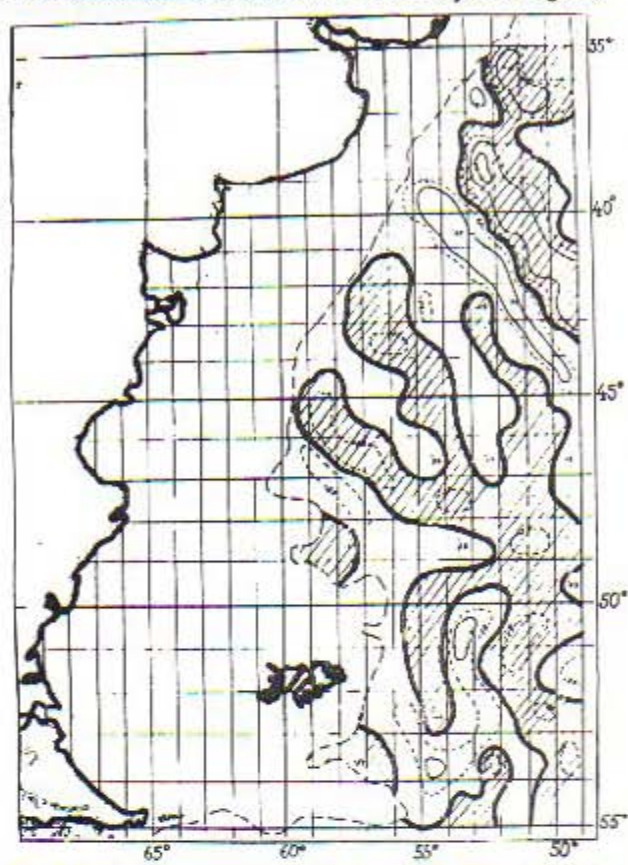


Fig. 7. Corrientes verticales en el horizonte de 500 m (verano).

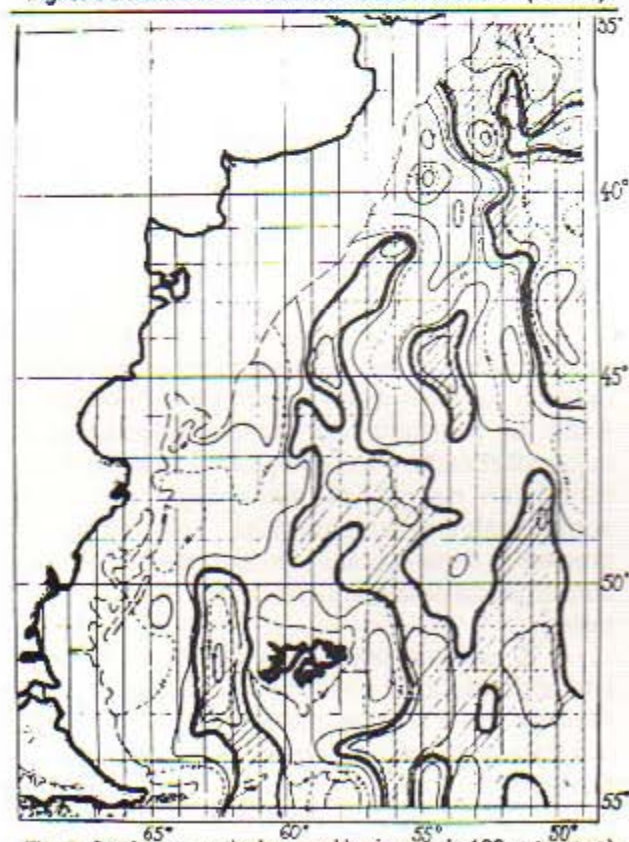


Fig. 6. Corrientes verticales en el horizonte de 100 m (verano).

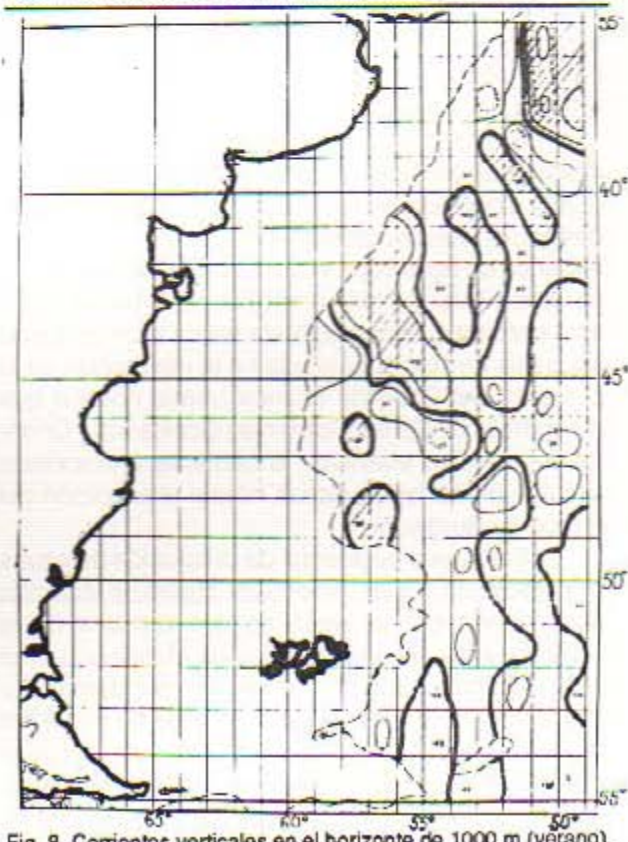


Fig. 8. Corrientes verticales en el horizonte de 1000 m (verano).

taludes continentales, ocupa un lugar importante en los procesos de enriquecimiento de la capa de nutrientes fotosintetizadores. La aparición de horizontes subyacentes (1000 m y menos) en capas superficiales se debe más a la estabilidad de las zonas de afloramiento, que a la magnitud de la velocidad de corrientes verticales, que como regla, son unos órdenes menores que la velocidad de corrientes horizontales. Por eso es muy importante establecer tales zonas en la plataforma y el talud, donde el afloramiento existe tanto en horizontes subyacentes como en capas subsuperficiales.

Las zonas de afloramiento estable de horizontes subyacentes que penetran toda la columna de agua y alcanzan capas con nutrientes fotosintetizadores aparecen en la Figura 9 (invierno) y Figura 10 (verano).

Las corrientes verticales y horizontales son componentes de un sistema complejo, dinámico y todavía no estudiado en muchos aspectos, en la circulación del agua del Atlántico Sudoccidental. Para tener una idea real sobre la dinámica de aguas del área hay que realizar mediciones de corrientes complejas y caras. Es especialmente importante para aquellas zonas del Atlántico Sudoccidental las particularidades dinámicas, las cuales son bastante parecidas a las características de actividad energética de zonas del Océano Mundial, tales como las zonas de convergencia subtropical y antártica. Por eso, antes de realizar experimentos de esta índole conviene dar una idea aproximada de la circulación de aguas general del área y de las características de sus componentes sureña, occidental, nórdica y oriental.

El sistema sureño de circulación se forma por intensificación de la Corriente Antártica Circumpolar (CAC) a la salida del flujo del Estrecho de Drake y su desviación considerable al norte. Las Islas Malvinas, el Banco de Burdwood y la actividad ciclónica activa en la atmósfera influyen considerablemente sobre este sistema. Las particularidades de la dinámica de aguas se forman aquí gracias a la interacción de la corriente del Cabo de Hornos (ramal nórdico que meandra la CAC), las Corrientes Occidental y Oriental de las Islas Malvinas, la corriente anticiclónica circular alrededor de dichas islas y el anticiclón del Banco de Burdwood.

El sistema occidental de circulación de aguas se caracteriza por la Corriente de chorro de Malvinas determinada por la unión de dos ramales de la corriente más al norte de las Islas Malvinas, por el campo correspondiente de vientos occidentales y sudoccidentales y por gradientes altos de densidad entre las aguas diluidas de plataforma y aguas oceánicas de talud. El gasto de la corriente constituye en la latitud de 42°S, 32 sverdrups en verano y 40 sverdrups en invierno.

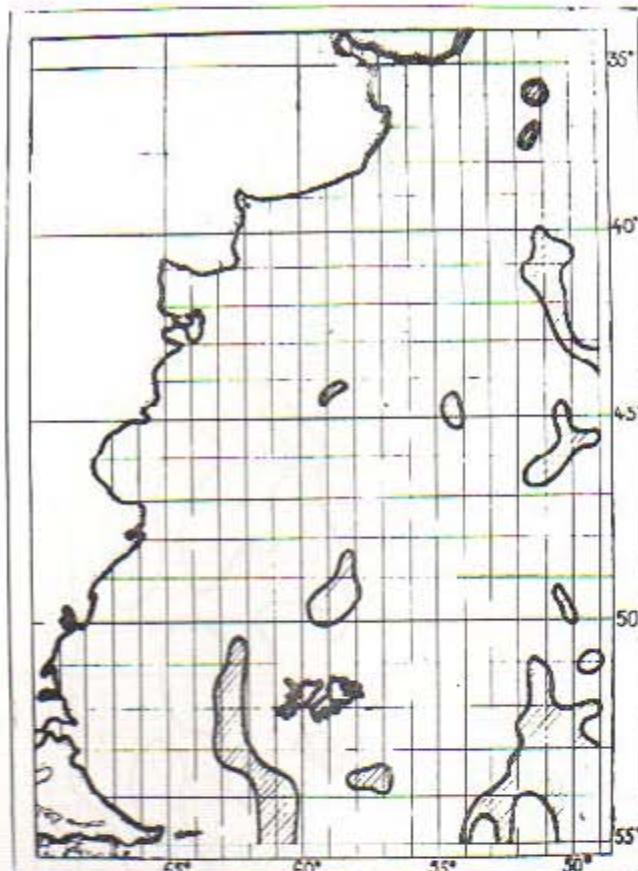


Fig. 9. Áreas de afloramiento de las aguas desde las profundidades de 1000, 500 y 100 m hacia la superficie (invierno).

Un momento importante del sistema occidental de circulación es la variabilidad de circulación de aguas costeras y de plataforma relacionadas con la acción estacionaria del Flujo Argentino en el período de su desarrollo máximo, con velocidades de hasta 10 - 15 cm/seg en verano y la zona de convergencia del flanco occidental de la Corriente de Malvinas y del Flujo Argentino que en el tramo de 46°S manifiesta indicios de una zona secundaria frontal con gradientes de temperatura de más de 2°C cada 10 millas.

El sistema nórdico de circulación es el resultado de la coincidencia de las corrientes principales del área: la Corriente de Malvinas y la Corriente de Brasil. Se caracteriza por grandes velocidades de flujos horizontales y verticales de muchos chorros, la formación de ciertos manchones de aguas subtropicales y subantárticas. Los valores de gradientes de temperatura en algunos tramos de la convergencia de corrientes alcanzan 3°-6°C cada 10 millas.

El sistema oriental es la resultante de la interacción de las Corrientes de Malvinas y de Brasil. Al pasar por el área de aguas profundas, los flujos disminuyen su velocidad empezando a meandrear fuertemente. Los meandros llegan a ser profundos cuando la velocidad de la corriente disminuye y es mayor la profundidad.

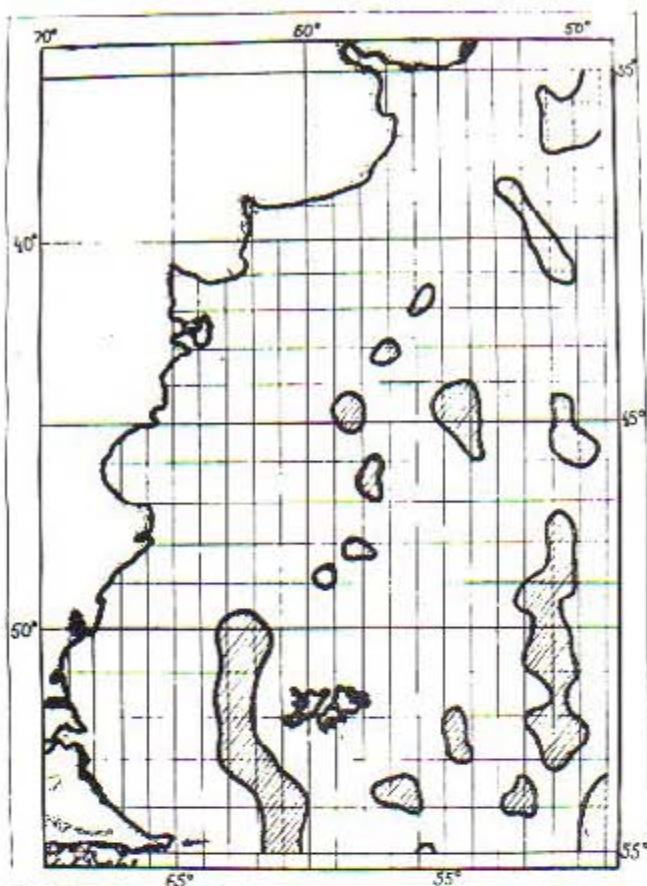


Fig. 10. Areas de afloramiento de las aguas desde las profundidades de 1000, 500 y 100 m hacia la superficie (verano)

En las capas profundas, inferiores a 2500 m a lo largo de la terraza nórdica de la plataforma de Malvinas en la dirección oeste y norte avanza la contracorriente que lleva el nombre de Corriente Antártica de Fondo (CAF) con gastos de alrededor de 60 sverdrups (Severov, 1990; 1991). Según cálculos el gasto de la CAF en el paralelo de 41°S fue de alrededor de 32 sverdrups en un verano con afloramiento máximo y profundización de su límite superior por debajo de los de 3000-3500 m.

Las modificaciones estacionarias de circulación de aguas del área se deben a cambios en la circulación atmosférica, cambios en los gastos de la Corriente Antártica Circumpolar en el Estrecho de Drake y gastos en la Corriente Antártica del Fondo al propagarse ésta desde el mar de Weddell hasta la depresión argentina.

El período invernal se caracteriza por el acrecentamiento del ramal occidental de la Corriente de Malvinas y el afloramiento del ramal oriental. El gasto de la Corriente de Malvinas Occidental es aproximadamente 9 sverdrups en verano y 10 sverdrups en invierno; en la Corriente de Malvinas Oriental es de 20 sverdrups en verano y 15 sverdrups en invierno.

Gracias al acrecentamiento de la actividad ciclónica en la atmósfera y de los vientos occidentales,

en invierno se afloja el anticiclón de Burdwood y la corriente anticiclónica insular alrededor de las Islas Malvinas; se acrecenta el flujo de aguas de la Corriente de Malvinas Occidental y aumentan los gastos del ramal principal (resultante) de la Corriente de Malvinas. Al acrecentamiento de esta corriente en invierno contribuye también el endulzamiento más intenso de las aguas costeras por el flujo desde el continente lo que aumenta los gradientes horizontales de densidad y por consiguiente la velocidad de la corriente.

Las corrientes verticales y horizontales de la parte sud-occidental del Océano Atlántico están estrechamente relacionadas entre sí. El sistema sureño de circulación de aguas se caracteriza por movimientos verticales intensos.

La posición de numerosas zonas de afloramiento y separación de aguas concuerda bien con la formación de torbellinos en la zona del ramal nórdico meandrante de la CAC, con las particularidades de los ramales occidentales y orientales de la Corriente de Malvinas al contornear las islas y el Banco de Burdwood, así como al salir los flujos a aguas someras. Al oeste de las Islas Malvinas, al salir la Corriente de Malvinas Occidental a la plataforma, se forma una zona intensa de afloramiento en la capa hasta 200 m con velocidades hasta  $5 \times 10^{-4}$  cm/seg.

En la plataforma de las islas y por encima del Banco de Burdwood, en la corriente anticiclónica circular y en el anticiclón, se forma la zona de sumersión de aguas superficiales frías y diluidas, fuente adicional probable de las masas de aguas antárticas intermedias de salinidad disminuida en el período invernal.

En la parte oriental del sistema sureño de circulación, en la zona de divergencia del ramal oriental de la Corriente Antártica Circumpolar, se forma la zona intensa de afloramiento. En su formación ejerce influencia la Corriente Antártica del Fondo al tropezarse con el talud continental. Como consecuencia de este afloramiento, en la parte central del área en la superficie y en los horizontes intermedios (0 - 800 m) se forma una vasta zona ciclónica de aguas: el ciclón central de escala planetario. Entre el chorro principal de la Corriente de Malvinas (el flanco occidental de esta corriente) y el flanco sureño de la zona de convergencia de las Corrientes de Malvinas y de Brasil el afloramiento alcanza la superficie de los horizontes de 800-1000 m con ciertas zonas localizadas a lo largo del talud continental entre 40° y 50°S (Fig. 9 y 10).

La zona de coincidencia de aguas subantárticas (Corriente de Malvinas) y subtropicales (Corriente de Brasil) (sistema nórdico de la circulación) se caracteriza por una heterogeneidad grande del campo de las corrientes verticales. Las zonas de afloramiento y sumersión de aguas en la parte nór-

dica del talud continental y por encima de las profundidades grandes concuerda con la posición de meandros, chorros y formación de torbellinos. Sin embargo, en la zona de convergencia subtropical el proceso de sumersión de aguas, especialmente en el flanco sureño del frente, es dominante.

El área del ciclón central entre las Corrientes de Brasil y de Malvinas y la CAC, representa una cuenca de relieve dinámico, estirada desde la CAC (53°-51°S) hacia el talud continental de la plataforma de Argentina (42°-45°S) en forma de meandro de escala planetaria. El eje de la cuenca está inclinado hacia el talud continental y su centro con profundidad 0-1000 m está desplazado hacia el oeste lo que caracteriza la aproximación del flanco noroccidental de la cuenca hacia el talud y el cambio de flujos sureños (Corriente de Malvinas) en los horizontes de 800-1000 m por los nórdicos (de origen atlántico). La estabilidad de la posición del ciclón central (en tiempo y espacio) está condicionada por la potencia de aguas que avanzan hacia el talud continental de la cuenca argentina y forman parte de la Corriente Antártica del Fondo (CAF) cuyos gastos pueden compararse con la Corriente del Golfo (Gulf Stream) (según cálculos, de hasta 40 sverdrups), y la divergencia de chorros de la CAC hacia el este de las Islas Malvinas.

La capa de discontinuidad de densidad  $\rho(z)$  (picroclina estacionaria) desempeña un papel importante tanto en la física como en la biología del océano. Es necesario conocer las particularidades de su dinámica. Habitualmente, al hacer intentos por explicar la productividad de diferentes áreas del Océano Mundial se recurre a cálculos de movimientos verticales y sobre su base se construyen las zonas de afloramiento y sumersión de aguas.

Las zonas de afloramiento se declaran potenciales en el sentido de bioproductividad debido a la subida posible de sustancias nutrientes junto con las aguas profundas. Sin embargo hay que tener en cuenta que las velocidades horizontales en estas zonas son mayores que las verticales en 4 o 5 órdenes. En el trabajo de Zyrianov (1980), se propone estudiar también la dinámica de la picroclina, ya que todos los matces de movimiento vertical en el océano se reflejan en la posición de la capa de discontinuidad de densidad. Además, para los habitantes del epipelagial la picroclina desempeña el papel de fondo líquido, por eso cuanto mayor su intensidad (gradiente) mayor su sensibilidad (Elizarov, 1977). El papel de la picroclina en la actividad del océano (el principio mini-max) se forma del modo siguiente: las áreas donde la profundidad de posición de la picroclina es menor (comparada con la capa de

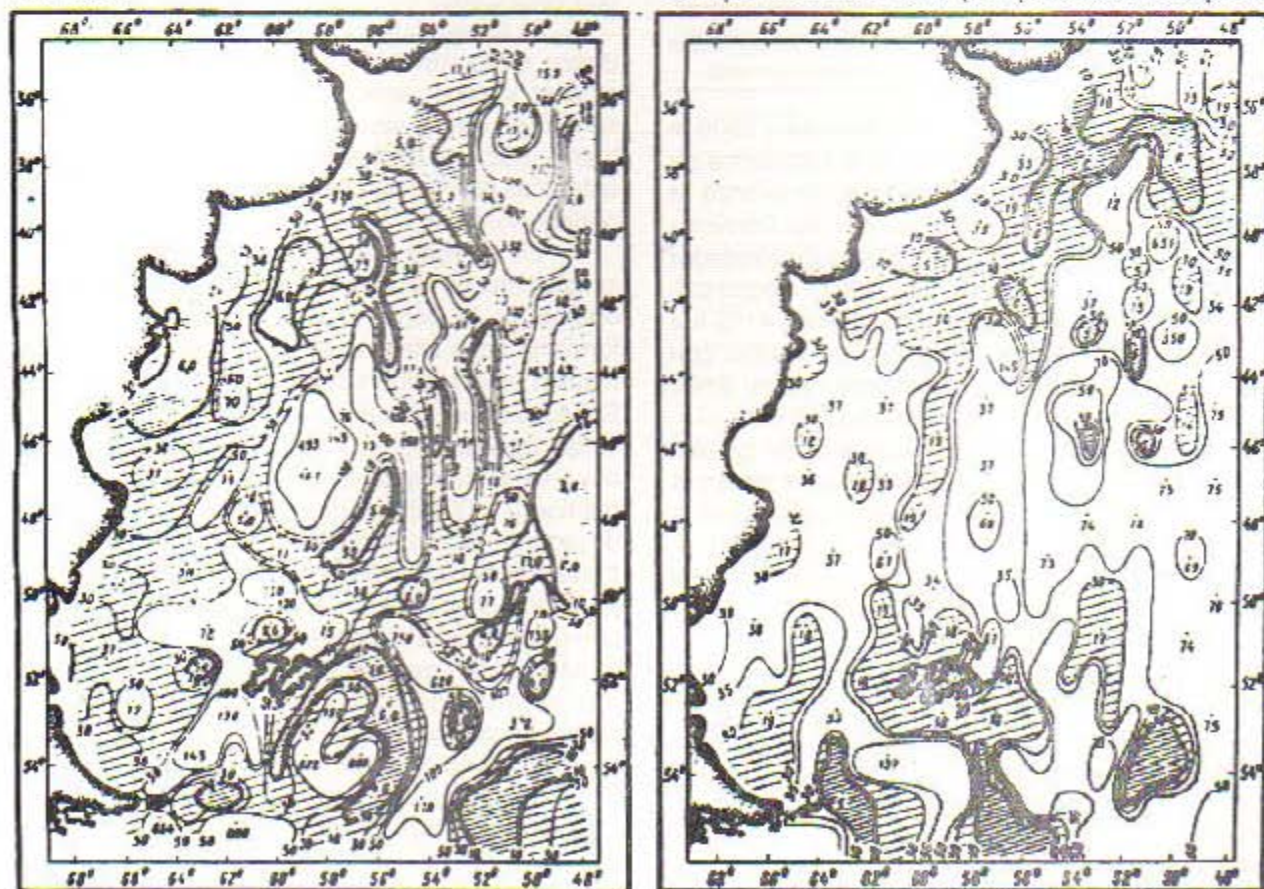


Fig. 11. Profundidad de posición de picroclina en invierno y en verano; áreas con profundidades no más de 50 m para invierno y no más de 30 m para verano (rayado claro); áreas con profundidades no más de 10 m (rayado denso).



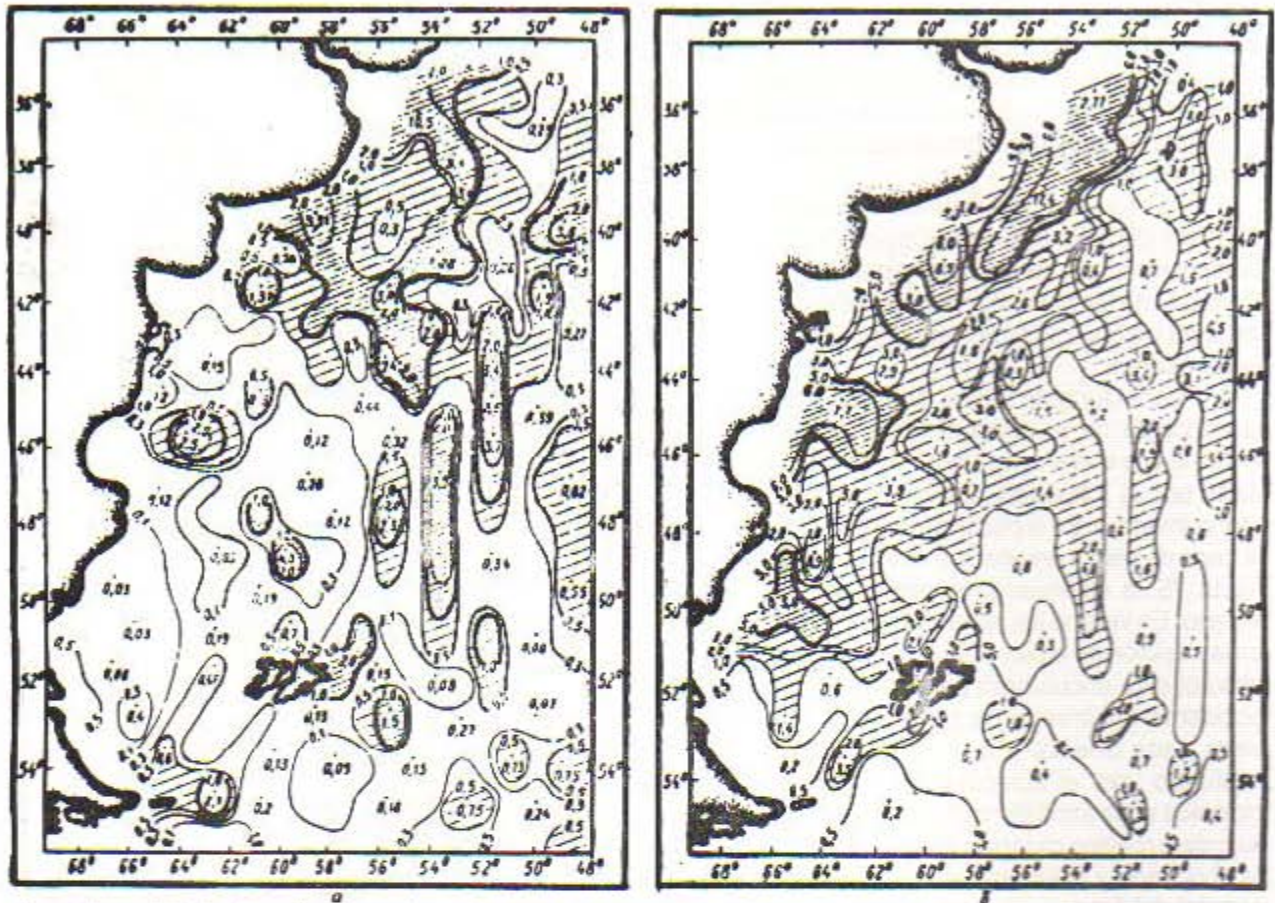


Fig. 12. Intensidad de picroclina (factor de escala  $10^{-7}$  g/cm $^4$ ; áreas con gradientes mayores de  $0,5 \cdot 10^{-7}$  g/cm $^4$  para invierno y  $1 \cdot 10^{-7}$  g/cm $^4$  para verano (rayado claro); áreas con gradientes mayores de  $1 \cdot 10^{-7}$  g/cm $^4$  para invierno y  $5 \cdot 10^{-7}$  g/cm $^4$  para verano (rayado denso).

fotosíntesis) y su intensidad es grande, probablemente tengan mayor bioproduktividad potencial que las áreas de mayor profundidad de posición de la picroclina o de menor intensidad.

La dificultad metodológica principal del cálculo de la posición de la capa de discontinuidad consiste en la necesidad de localizar mediante valores discretos de densidad su punto de inflexión en los horizontes estándar, lo que supone por sí la tarea discontinua de la función.

Zyrianov (1980) propuso para estos objetivos utilizar la aproximación de *spline*: primeramente encontrar la capa de modificación máxima  $p(z)$  y en el interior de esta capa aproximar  $p(z)$  con el *spline* de tercer orden. Por el algoritmo propuesto por Zyrianov (1980) y por el conjunto de datos de densidad preparado por el autor, se realizaron cálculos de profundidades de la posición de la picroclina y su intensidad para los períodos de verano y de invierno y para toda la parte sudoccidental del Atlántico (Fig. 11 y 12).

Las características principales de la picroclina para esta área también son consecuencia de la dinámica de las aguas y del sistema complejo de corrientes. Así pues, el ciclón cerca de la Isla de los Estados ( $54^{\circ}30'S$  y  $62^{\circ}W$ ) hace aflorar la picroclina

hacia la superficie hasta las profundidades de 10 m (Fig. 11). El anticiclón por encima del Banco de Burdwood por el contrario, hace profundizar la picroclina hasta 137 m en verano (Fig. 11b) y hasta las profundidades de la picroclina oceánica principal (aproximadamente 622 m) en invierno (Fig. 11a). Varios torbellinos ciclónicos al este de las Islas Malvinas también hacen aflorar la capa de discontinuidad de densidad hacia la superficie hasta las profundidades entre 5 y 17 m en invierno (Fig. 11a) y hasta 10 y 17 m en verano (Fig. 11b). La invasión de las masas de agua del océano o incluso la modificación de una misma masa de agua en la plataforma se traducen en la conducta del relieve de la picroclina. En las Figuras 11 y 12 se ve claramente la lengua de intensidad elevada de la picroclina y profundidades pequeñas de su posición, estirada desde la boca del Río de la Plata en la dirección sudoriental en invierno y al sur en verano, lo que se debe sin duda alguna al endulzamiento de aguas de plataforma por las aguas del Río de la Plata.

En las Figuras 11a y 12a se ve que en el área del ciclón central hay tanto zonas de afloramiento de la picroclina, como zonas de su profundización. Ello se explica por el hecho de que el ciclón central esté muy propagado, tenga forma irregular con meandros

y el mismo forme meandros ciclónicos y anticiclónicos menores que en el ciclón principal de escala planetaria, pero superiores a éste en intensidad. Así, por ejemplo, la profundidad en el centro del área (Fig. 11a) está condicionada por el meandro anticiclónico de la corriente.

Las formas de relieve de la pinoquina estiradas meridionalmente son características para la parte central del talud continental; se deben a la Corriente de Malvinas de chorro en la parte occidental del área y a los flujos fuertemente meandrados de la parte oriental.

Considerando todo el Atlántico Sudoccidental la conducta de la pinoquina es más variable en invierno que en verano (Fig. 11) lo cual está condicionado por la influencia adicional de la convección otoño-invierno. En la plataforma de las Islas Malvinas la capa de discontinuidad de densidad se profundiza hasta 75 m en invierno y sólo hasta 18-30 m en verano. En verano las zonas de profundidades bajas en la posición de la pinoquina y a la vez de gradientes elevados se encuentran principalmente en la parte occidental del área (en la zona costera); en invierno en la parte oriental (Fig. 11 y 12). Ello puede ser explicado por el acrecentamiento de la actividad ciclónica en la atmósfera en invierno, el aumento del flujo de torbellino ciclónico dirigido desde la atmósfera al océano y la intensidad de ciclones en la parte oriental del área.

Los resultados de las investigaciones sobre las particularidades de la circulación y dinámica de las aguas, las características hidroquímicas y estadísticas de las masas de agua y los límites entre las estructuras de agua y la variabilidad de condiciones constituyen la base de la información sobre los fundamentos oceanológicos respecto a la productividad pesquera de aguas de la plataforma y el talud continental del Atlántico Sudoccidental (Severov, 1990; 1991).

Al determinar las relaciones entre las condiciones del medio ambiente y la formación de zonas de bioproduktividad de las aguas de plataforma y talud del Atlántico Sudoccidental, también se utilizaron las zonas de afloramiento en la capa fótica (Fig. 9 y 10) obtenidas en base a cálculos de corrientes verticales. Además, se consideraron las características de la pinoquina (Fig. 11 y 12): la situación de zonas con profundidades no mayores de 10 m en invierno y 10-20 m en verano y con gradientes en la capa de discontinuidad de densidad no menores de  $1 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^4$  para el invierno y  $5 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^4$  para el verano (Fig. 13).

Así pues en los complejos de factores abióticos estaban incluidos los siguientes parámetros: las características de las zonas frontales, la convergencia de corrientes, la información sobre la situación de zonas de afloramiento intenso, el avance y propa-

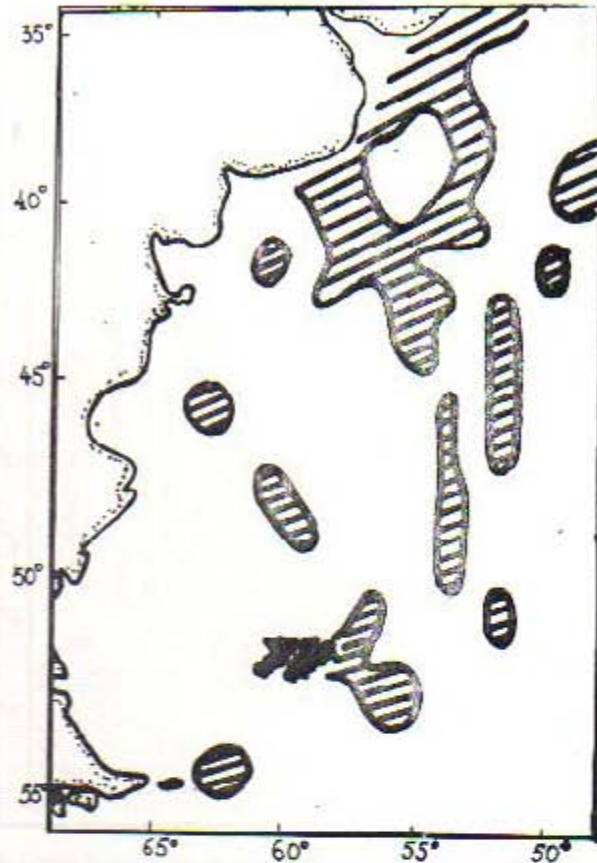


Fig. 13. Posición de zonas con los valores máximos de la intensidad de pinoquina para invierno.

gación por la plataforma de aguas diluidas de la descarga continental, los valores de oxígeno disuelto y fosfatos y la situación de focos de acumulación advectiva de estas sustancias a cuenta de corrientes horizontales y verticales, así como las características de profundidad e intensidad de la pinoquina y la información sobre la situación de zonas con valores altos de producción primaria y biomasa de plancton. Esto sirvió como fundamento para determinar por medio del análisis multifactorial de las condiciones oceanológicas, las zonas de plataforma y de talud donde se observaba coincidencia espacial entre los factores abióticos estudiados.

En la plataforma (0-200 m) se separaron cuatro zonas:

- a) zona del Río de la Plata (35°-39°S; 53°-57°W); b) zona de Mar del Plata - Golfo San Jorge (40°-46°S; 56°-66°W); c) zona sudoccidental (al noreste de la Isla Tierra del Fuego, 52°-55°S; 63°-66°W) y d) zona nórdica y noroccidental de la plataforma de las Islas Malvinas (49°-51°S; 60°-64°W).

Los factores abióticos comunes para estas zonas, son los siguientes: las convergencias de corrientes (Corrientes de Malvinas y Brasil en el noroeste, Flujo Malvino y Argentino en la parte

central de la plataforma, Corriente del Cabo de Hornos y Corriente Anticiclónica alrededor de las Islas Malvinas, ramales occidental y oriental de la Corriente de Malvinas al norte de las islas); valores elevados de oxígeno disuelto (6,5-8,5 ml/l) y fosfatos (1,0-2,2 mkg-at P/l); valores altos de producción primaria (500-1000 mgC/m<sup>2</sup> y más) y biomasa de plancton (200-500 mg/m<sup>3</sup> en la capa de 0-100 m); valores mínimos de profundidad de la pycnoclina (menos de 10 m en invierno y 10-20m en verano) y valores máximos de su intensidad (en invierno no menos de  $1 \times 10^{-7}$  g/cm<sup>4</sup>, en verano no menos de  $5 \times 10^{-7}$  g/cm<sup>4</sup>); valores altos de gradientes horizontales según una o varias características hidrográficas (temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y fosfatos).

Estas zonas se distinguen por la presencia o ausencia de bioproduktividades elevadas, intensidades de corrientes convergentes y magnitudes de gradientes horizontales.

En la parte nórdica de la plataforma, en la convergencia subtropical, los gradientes de temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y fosfatos son máximos; en la parte central de plataforma, en el frente secundario subantártico, están expresados en mayor grado los gradientes horizontales de temperatura; en la parte sudoccidental de plataforma predominan los gradientes horizontales de salinidad y oxígeno disuelto y al noroeste y al norte de las Islas Malvinas los gradientes de densidad, salinidad y fosfatos. La zona sudoccidental se distingue de otras por los valores altos de velocidad vertical de las corrientes e intensidad de afloramiento en la capa desde 200 m hacia la superficie y la zona al norte de las Islas Malvinas por la presencia de focos de acumulación de oxígeno y fosfatos cerca del fondo (150-200 m).

En el talud continental (0-1000 m) se observa la coincidencia espacial de zonas de convergencia de corrientes en los horizontes superficiales, intermedios y/o profundos, zonas con valores altos de gradientes de características oceanológicas, zonas de afloramientos de la capa de fotosíntesis, tramos con valores máximos de intensidad de la pycnoclina y valores mínimos de su profundidad, zonas con valores altos de oxígeno disuelto (más de 6,0 ml/l) y fosfatos (1-3 mkg-at P/l) desde la superficie hasta las capas de profundidad (500-1000 m) y zonas de acumulación de oxígeno y fosfatos en la capa fótica (150 m) y en la pelagial (500 m). Según los indicios coincidentes en cada zona se separaron: la parte nórdica de talud (34°-37°S), la parte central de talud (43°-47°S), el talud nórdico de las Islas Malvinas (49°-50°S; 57°-60°W) y el talud sudoriental de las Islas Malvinas (51°-54°S; 54°-60°W).

A diferencia de las zonas de plataforma, para las cuales el principal factor abiótico es la presencia

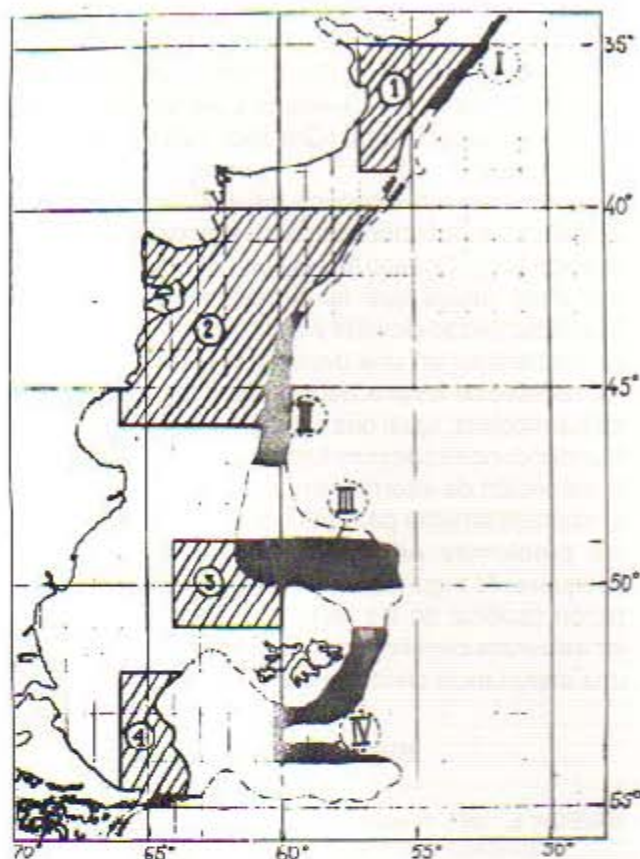


Fig. 14. Areas del talud y plataforma separados por conjuntos abióticos de bioproduktividad.

de convergencias de corrientes, las zonas de grandes profundidades fuera del talud se caracterizan por: convergencia de corrientes, afloramientos que alcanzan la superficie y zonas de acumulación de oxígeno, fosfatos en grandes profundidades y en la capa superficial por encima de éstas.

Sobre la formación de complejos de factores abióticos en las zonas de plataforma y talud indicadas (Fig. 14) la influencia principal está ejercida por las corrientes horizontales y su convergencia en la plataforma y las corrientes verticales por encima de las profundidades grandes del océano. Ello encuentra su confirmación en la variabilidad estacional en las magnitudes de las características oceanológicas que forman complejos de factores abióticos por zonas. Esto puede ser explicado por la intensificación de la Corriente de Malvinas, la Corriente Antártica Circumpolar (CAC), la Corriente Antártica del Furo (CAF) en invierno y por la agudización del frente subantártico (secundario) de plataforma a cuenta del Flujo Argentino y convergencia de los ramales occidental y oriental de la Corriente de Malvinas en verano.

Las zonas de plataforma y talud continental determinadas en este trabajo como complejos de factores oceanológicos respecto a su bioproducción

tividad, tienen perspectiva y son bastante estables para la pesca, lo que se confirma por las investigaciones científicas pesqueras realizadas independientemente por la Argentina (Otero, 1981), así como por otras observaciones soviéticas y extranjeras en el Atlántico Sudoccidental (Grechko, 1981 y Gordon, 1981, 1982).

El área tan dinámica del Atlántico Sudoccidental con sus factores oceanológicos propios en relación con el Océano Mundial, su interdependencia con éste, indica que la formación de zonas de bioproduktividad elevada y las condiciones de pesca se encuentran en una dependencia grande con la variabilidad de los procesos dominantes en el océano y atmósfera. Igual que en otras áreas del Océano Mundial donde se desarrollan actividades pesqueras, la obtención de información sobre tal variabilidad y fundamentalmente para periodos cortos, es uno de los problemas principales de la oceanografía pesquera. Al organizar el monitoreo para la explotación racional de los recursos, la coordinación de los esfuerzos científicos de diferentes países adquiere una importancia científica y práctica.

#### BIBLIOGRAFIA

- BALECH, E. 1965. Nuevas contribuciones a los esquemas de circulación oceánica frente a la Argentina. *Anais Acad. Bras. Cien. Supl.*, Vol. 37.
- BOLTOVGKOY, E. 1970. Masas de agua en la superficie del Atlántico Sudoeste, según indicadores biológicos foraminíferos. S.H.N., Argentina.
- BUSCAGLIA, G. L. 1971. On the Circulation of the Intermediate Water in the Southwestern Atlantic Ocean. *J. Mar. Res.*, 29(3).
- CORDON, A. 1981. South Atlantic thermocline ventilation. *Deep-Sea Res.*, 28 (11A).
- CORDON, A. 1982. Satellite observations of the Brazil and Falkland currents - 1975 to 1976 and 1978. *Deep-Sea Res.*, 29 (3A).
- DEFANT, A. 1961. *Physical Oceanography*. Pergamon, Oxford.
- ELIZAROV, A. A. 1977. Sobre las condiciones oceanológicas de irregularidad especial de productividad biológica. Cuestiones de oceanología pesquera del Océano Mundial Murmansk.
- GARNER, D. M., G. NEUMANN y W. J. PIERSON. 1962. The average horizontal wind driven mass transport of the Atlantic for february as obtained by numerical methods. *Proc. Symp. Math. Hydrodynam. Meth. Phys. Oceanogr.*, Sept, 1961. Inst. Meeresk., Hamburg.
- GRECHKO, G. M., G. A. GRISHIN y G. A. TOLKACHENKO. 1981. Observaciones por manifestaciones visibles de la dinámica del océano desde el borde de la estación orbital "saliut-6". En: *Investigación de la Tierra desde el espacio*. Editorial de la AC URSS, 4.
- LUSQUIÑOS, A. y A. VALDES. 1971. Aportes al conocimiento de las masas de agua del Atlántico Sudoccidental. S.H.N., Argentina, 659.
- MARTINEAU, D.P. 1953. The influence of the current systems and lateral mixing upon Antarctic intermediate water in the South Atlantic. *WHOI, Ref. 53-72*.
- OTERO, H. O., J. PEREZ COMAS y R. PERROTTA. 1981. Areas óptimas de pesca de altura en el Mar Argentino. *Contrib. INIDEP*, 398.
- REID, J. 1977. On the characteristics and circulation of the Southwestern Atlantic Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 7, 1.
- SEVEROV, D. N. Condiciones oceanológicas de la parte sudoccidental del Océano Atlántico por los datos del Atlas de características promediadas por muchos años. Informe al Cuarto Simposio Científico de la Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo. Noviembre de 1987. Resumen.
- SEVEROV, D. N. Masas de agua en el área del Atlántico Sudoccidental. Sus características y distribución. Informe al Quinto Simposio Científico de la Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo, Montevideo. Noviembre de 1988. Resumen.
- SVERDRUP, H. 1939. Lateral mixing in the deep water of the South Atlantic Ocean. *J. Mar. Res.*
- SVERDRUP, H., M. JONSON y R. FLEMING. 1942. *The oceans, their physics, chemistry and general biology*. New York: Prentice Hall.
- TAFF, B. A. 1963. Distribution of salinity and dissolved oxygen on surfaces of uniform potential specific volume in the South Atlantic, South Pacific and Indian Oceans. *J. Mar. Res.*
- WÜST, C. 1957. Strömgeschwindigkeiten und Strömungen in den Tiefen des Atlantischen Ozeans. *Wiss. Ergeb. Deutsch Atlant. Exped. Meteor 1925-1927*, 6. Teil 2.
- ZYRIANOV, V. N. y D. N. SEVEROV. 1979. Circulación de aguas del área de Malvinas y Patagonia y su variabilidad por estaciones. *Oceanología*, 19(5).
- ZYRIANOV, V. N. 1980. Dinámica de aguas del Océano Atlántico Sudoccidental y particularidades de posición de pycnoclina. *Trudy VNIRO, M.: Pishchevaya promyshlennost (Industria Alimenticia)*.