

Ryszard HAPTER, Bogdan WOŹNIAK

Polish Academy of Sciences
Institute of Oceanology — Sopot
Krzysztof DOBROWOLSKI
Gdańsk Institute of Technology
Computer Centre

PRIMARY PRODUCTION IN EZCURRA INLET DURING THE ANTARCTIC SUMMER OF 1977/78*

The purpose of this study was to estimate primary production and the concentration of phytoplankton biomass in Ezcurra Inlet and to characterize the optical prerequisites for the process of photosynthesis in this basin. The experiments were carried out during the Second Polish Antarctic Expedition on board the m.s. „Antoni Garnuszewski” anchored at a fixed position in Ezcurra Inlet. The experiments included measurements of primary production of the biomass of marine phytoplankton, determination of the chlorophyll *a* concentration as an indicator of the biomass of phytoplankton, as well as optical observation of insolation of the basin and diffusion of radiant energy into the water body (the last-named have been described in a preceding paper in this volume). A total of 23 series of measurements of these parameters were run on various days during the research period.

In this article, only the results of these measurements and a preliminary energetic assessment of the efficiency of photosynthesis and its correlation with insolation of the sea surface, are presented.

The measurements of primary production per unit volume of sea water, $P\Delta_t(z)$, were run in situ at ten depths in the sea ($z=1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40$ and 50m) by the light-and-dark-bottle method using ^{14}C carbon isotope [4, 7]. The samples were exposed for 2—5-hr time intervals, Δt , at midday. The quantity of assimilated carbon during this period was calculated from the Strickland — Parsons equation [8] utilizing, among other things, the results of determinations of pH, alkalinity, salinity and temperature of sea water, carried out simultaneously by Lauer and Bojanowski. A correction factor accounting for the isotope effect, equal to 1.05, was used throughout. Primary production calculated in this

* These studies were carried out under the research program MR II 16 coordinated by the Institute of Ecology of the Polish Academy of Sciences. They were sponsored in part under research program MR I 15 coordinated by the Institute of Hydro-Engineering of the Polish Academy of Sciences.

manner refers to the Δt time intervals. The diurnal primary production per unit volume, $P_d(z)$, determined from the $P_{\Delta t}(z)$ values using the light factor [1, 2]:

$$P_d(z) = P_{\Delta t}(z) \frac{1}{\eta_{\Delta t}^w(z)}$$

where: $\eta_d^w(z)$ is the diurnal solar energy dose within the visible light band reaching depth z ;

$\eta_{\Delta t}^w(z)$ is the solar energy dose within the visible light band reaching depth z during the exposition of the samples, Δt .

The quantity of chlorophyll *a*, extracted from the plankton, which had been filtered off the water sampled at various depths, was taken to be the indicator of the biomass of phytoplankton. Extraction was carried out with 90% aqueous acetone.

The concentration of chlorophyll was determined spectrophotometrically using the Strickland — Parsons equation [8] for calculations.

The magnitudes of the diurnal primary production per unit volume of sea water, expressed in weight units of assimilated carbon, as well as the concentrations of chlorophyll *a* at various depths in the sea are listed in Tables 1 and 2.

In Fig. 1A, exemplary, extremal and intermediate vertical distributions of the diurnal primary production, $P_d(z)$, are shown. As seen, in the majority of cases, distinct maxima of the vertical distribution of the photosynthetic intensity, occurring at various depths within the 0—7 m surface layer, can be distinguished. The maxima usually occurred at a depth of 5 m. The vertical distribution of the intensity of photosynthesis, averaged for all measurements, is shown in Fig. 1B. The accumulative contribution of particular layers to the total primary production in a vertical water column, estimated on the basis of this distribution, is illustrated by the following specification:

Layer, Δz , [m]	0-1	0-3	0-5	0-7	0-10	0-15	0-20	0-30	0-40
% Total production	35	17	30	43	59	78	88	97	99

According to optical criteria, the boundary of the euphotic layer, is that reached by 1% of light of the wavelength corresponding to the maximum transmission. In the case considered, the mean depth was approx. 25 m (cf. the preceding paper in this volume) thus corresponding, accor-

Table 1. Vertical distribution of the diurnal magnitudes of primary production, $P_d(z)$ in the seaTab. 1. Pionowe rozkłady wielkości całodziennych produkcji pierwotnych w morzu — $P_d(z)$

Date Data	$P_d(z)$ [mg C · m ⁻³ · d ⁻¹]									
	1 m	3 m	5 m	7 m	10 m	15 m	20 m	30 m	40 m	50 m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
20.XII	29.5	32.7	35.8	36.6	35.2	28.6	17.0	6.42	1.50	0.26
29.XII	15.4	34.6	41.9	24.3	9.82	4.41	0.83	0.09	0.0	0.0
2.I	2.24	15.8	17.5	17.1	15.7	11.7	4.54	1.15	0.84	0.17
5.I	14.1	36.2	42.5	22.9	9.37	3.57	0.47	0.09	0.0	0.0
15.I	8.30	12.4	13.8	13.1	12.1	9.98	8.38	3.28	0.67	0.21
17.I	17.0	39.3	45.2	43.4	36.1	20.9	10.6	2.25	0.52	0.18
19.I	32.1	49.2	47.3	43.0	29.1	13.8	7.41	1.00	0.09	0.0
21.I	55.6	66.3	68.8	62.9	42.4	24.2	10.6	2.10	0.72	0.51
27.I	96.0	98.4	95.2	88.4	66.9	35.4	20.5	7.14	2.48	0.25
30.I	52.7	50.2	44.5	36.8	23.0	12.8	5.66	1.31	0.67	0.0
2.II	77.1	84.9	84.7	75.6	53.9	27.8	12.5	3.45	0.89	0.16
4.II	46.4	43.7	38.1	32.8	22.8	13.7	6.96	0.34	0.06	0.0
7.II	20.4	32.0	38.3	40.1	40.0	23.4	10.9	3.81	0.90	0.32
10.II	14.0	22.2	26.9	28.3	27.5	16.4	7.45	2.63	0.99	0.33
12.II	18.6	22.0	24.0	25.1	24.1	21.0	12.1	3.63	0.93	0.33
14.II	71.5	70.9	68.7	65.8	58.8	32.0	18.6	5.06	2.19	1.16
16.II	36.9	50.7	55.3	56.1	50.3	21.6	13.5	2.83	1.68	1.17
21.II	31.4	34.7	36.0	35.4	31.8	16.0	8.01	1.67	0.43	0.13
24.II	33.9	41.2	48.5	43.8	31.2	15.4	6.41	1.46	0.63	0.18
28.II	59.3	58.1	55.2	49.2	30.5	10.8	5.41	2.79	1.27	0.95
4.III	41.6	46.0	56.4	54.2	45.2	24.1	17.3	4.06	1.47	1.10
7.III	9.18	18.8	17.4	16.1	13.7	8.48	3.38	1.12	0.52	0.11
10.III	7.56	11.4	10.8	9.87	7.99	3.89	2.09	0.27	0.09	0.0

ding to our results, to approx. 93% of the total primary production occurring in the water body.

Numerical integration of the $P_d(z)$ curves over the depth gives the diurnal total primary production in a water column under the unit area, P_{ds} , which in turn, gives a global description of the photosynthetic process in the water body. The value of the production, P_{ds} , is listed in column 2, Table 3. As seen, primary production of the Ezcurra Inlet water body fluctuated substantially during the research period. In extreme

Table 2. Vertical distribution of the concentrations of chlorophyll *a*, *B*, in the seaTab. 2. Pionowe rozkłady koncentracji chlorofilu *a* w morzu — *B*

Date	<i>B</i> [mg/m ³]							
	1 m	5 m	10 m	15 m	20 m	30 m	40 m	50 m
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20.XII	3.44	4.89	3.53	3.81	3.20	3.16	3.12	2.90
29.XII	1.33	1.21	1.50	1.38	1.16	1.09	1.01	1.20
2.I	1.01	1.21	1.12	1.11	1.02	0.89	0.76	0.79
5.I	0.43	1.27	0.78	0.86	0.69	0.73	0.49	
14.I	0.65	0.60	0.59	6.57	0.62	0.21	0.42	
15.I	0.54	0.56	0.52	0.56	0.56	0.54	0.51	
17.I	0.67	1.29	1.29	1.29	1.22	0.92	0.76	
19.I	1.40	1.42	1.04	1.33	0.95	1.21	1.35	
21.I	1.41	1.55	1.41	1.42	1.42	1.07		1.01
27.I	0.82	1.03	1.25	0.96	1.09	0.92		0.67
30.I	1.05	1.07	1.01	0.97	0.93	0.70		0.33
2.II	1.37	1.66	1.15	1.01	0.77	0.69		0.52
4.II	1.34	1.39	1.35	1.47	1.37	1.18		0.97
7.II	1.46	1.39	1.34	1.47	1.37	1.18		0.97
10.II	1.12	1.12	1.18	1.23	1.21	1.17		1.12
12.II	1.05	1.03	1.03	1.07	1.03	1.02		0.80
14.II	1.06	1.09	1.13	1.13	1.06	1.16		0.79
16.II	1.42	1.48	1.61	1.61	1.48	1.57		1.17
21.II	1.28	1.27	1.16	1.33	1.36	1.12		0.90
24.II	1.38	1.49	1.54	1.53	1.25	1.07		0.65
28.II	1.64	1.60	1.64	1.68	1.63	1.54		1.23
4.III	1.37	1.54	1.55	1.35	1.36	1.31		0.80
7.III	0.48	0.55	0.56	0.59	0.56	0.59		0.61
10.III	0.67	0.64	0.66	0.71	0.66	0.77		0.74

cases the diurnal production differed approx. 10-fold, the absolute values ranging from 150 to 1500 mg C/m²d. The mean value of the production observed, \bar{P}_{ds} , amounted to 665 mg C/m²d with the standard deviation, δ_p , of 332 mg/m²d. The mean value indicates that the primary production of Ezcurra Inlet is slightly higher than that of the open oceanic waters in the South Shetlands region (compare, for instance, with the data in [13]). It is, however, comparable with the productivity of the Baltic waters during the summer (compare with the data in [5] and [6]).

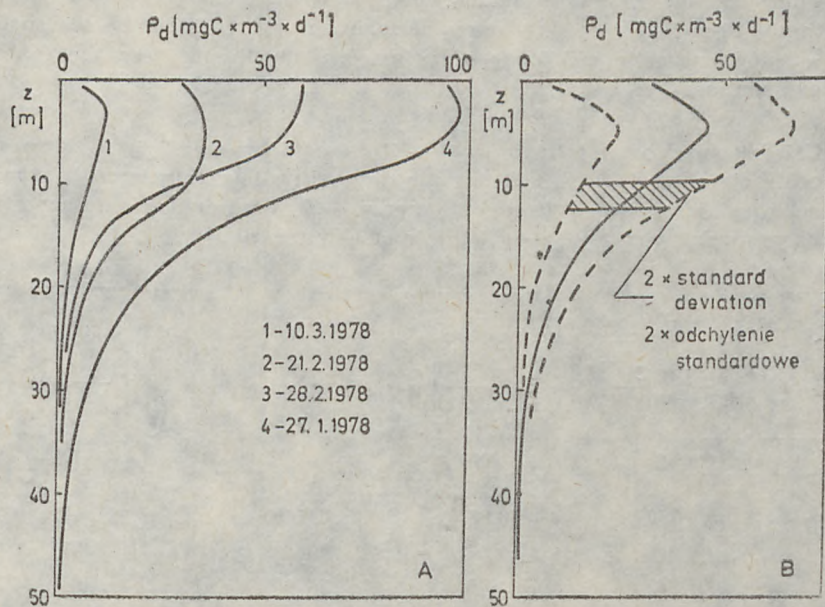


Fig. 1. Vertical distribution of diurnal primary production in the sea; A — exemplary, extreme and intermediate productivity observed; B — averaged variation of all observations together with the interval of standard deviations of the observed magnitudes of primary production

Rys. 1. Pionowe rozkłady całodziennych produkcji pierwotnych w morzu: A — przykładowe, skrajne i pośrednie z obserwowanych, B — przebieg uśredniony z wszystkich obserwacji wraz z przedziałem odchyłeń standardowych notowanych wielkości produkcji

The strong differentiation of the photosynthetic intensity observed in time, was due to fluctuation of abiotic and biotic conditions of the marine primary production. One of the most important factors directly affecting the absolute value of primary production is the concentration of the biomass of phytoplankton in the sea (represented here by the contents of chlorophyll *a*) and irradiation of the water body. In this case these two factors fluctuated considerably in time (those relating to irradiance conditions of the surface and interior of the basin are discussed in the preceding paper in this volume).

Column 3, Table 3, gives the mean concentration of chlorophyll *a* in the 0—30-m layer, \bar{B} , which was determined on the basis of the data in Table 2. As seen, in extreme cases the concentrations, \bar{B} , differed approx. 6-fold and ranged from 0.54 to 3.62 mg/m^3 , whereas the mean value of \bar{B} was 1.18 mg/m^3 with a standard deviation of 0.58 mg/m^3 .

The energetic efficiency of primary production is a parameter which characterizes the effect of irradiation and concentration of phytoplankton

Table 3. Diurnal primary production, P_{ds} , mean concentrations of chlorophyll *a* in the 0–30-m layer, \bar{B} , daily doses of solar energy reaching the sea surface, η_p , and energetic efficiency of primary production, r (see the text for explanations)

Tab. 3. Całodzienne produkcje pierwotne — P_{ds} , średnie w warstwie 0–30 m koncentracje chlorofilu *a* — \bar{B} , dzienne dozy energii promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię morza — η_p oraz wydajność energetyczna produkcji pierwotnej — r (objaśnienia w tekście)

Date Data	P_{ds} $\left[\frac{\text{mg C}}{\text{m}^2 \text{ d}} \right]$	\bar{B} $\left[\frac{\text{mg Chl}}{\text{m}^3} \right]$	η_p $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right]$	r $\left[10^{-3} \frac{\text{mg C} \cdot \text{m}^3}{\text{kJ} \cdot \text{mg Chl}} \right]$
1	2	3	4	5
20.XII	779	3.62	24760	8.7
29.XII	308	1.27	29650	8.2
2.I	287	1.06	26990	8.4
5.I	297	0.80	7180	51.7
15.I	303	0.55	18210	30.3
17.I	663	1.15	23260	24.8
19.I	596	1.19	14270	35.1
21.I	943	1.38	21840	31.3
27.I	1495	1.03	13720	105.8
30.I	606	0.94	3510	183.7
2.II	1173	1.05	17630	63.4
4.II	555	1.35	8750	47.0
7.II	867	1.36	12590	50.1
10.II	481	1.18	13600	30.0
12.II	531	1.04	17500	29.0
14.II	1206	1.10	10410	105.3
16.II	897	1.53	16960	34.6
21.II	581	1.26	10470	44.0
24.II	627	1.36	8510	54.2
28.II	744	1.62	17500	26.3
4.III	931	1.41	20230	32.6
7.III	272	0.86	16880	28.8
10.III	154	0.68	7560	30.0

on the global effect of photosynthesis in the water body and is described here with a simplified relation:

$$r = \frac{P_{ds}}{\bar{B} \eta_p}$$

where η_p is the diurnal dose of solar radiation over the whole spectral range reaching the sea surface (cf. column 4, Table 3).

The efficiency of primary production in the sea, r , calculated for particular days, indicates a certain correlation with insolation. There is a tendency for parameter r to decline with increasing energy, η_p (Fig. 2),

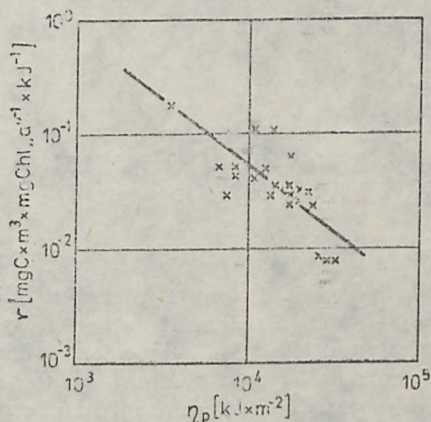


Fig. 2. Relationship between the efficiency of primary production, r , and diurnal solar radiation doses reaching the sea surface
The data points are approximated by a curve described by the equation $\log r = -1.16 \log \eta_p + 3.365$

Rys. 2. Współzależność wydajności produkcji pierwotnej r , z całodziennymi dozami energii promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię morza
Położenie punktów eksperymentalnych zbliża krzywa opisana równaniem $\log r = -1.16 \log \eta_p + 3.365$

the relationship being hyperbolic. Data points in this diagram were approximated by an empirical equation derived by the least-squares method:

$$\log r = -1.16 \log \eta_p + 3.363$$

where r is the efficiency in $[\text{mg C} \cdot \text{m}^3 / \text{mg Chl} \cdot \text{kJ}]$ and η_p in $[\text{kJ}/\text{m}^2]$.

The corresponding standard deviations of successive terms of the right-hand side of the equation are $\delta_1 = 0.36$ and $\delta_2 = 1.118$. The relatively high dispersion of the data points in this relationship is due to the assumptions made, and differentiation — in space and time — of a va-

riety of other, abiotic and biotic environmental factors affecting photosynthesis, not considered here.

A detailed analysis of the effect of these factors on the energetic efficiency of primary productivity of marine phytoplankton is now being carried out by the authors.

Ryszard HAPTER, Bogdan WOŹNIAK

Polska Akademia Nauk
Zakład Oceanologii w Sopocie

Krzysztof DOBROWOLSKI
Politechnika Gdańska
Ośrodek Obliczeniowy

PRODUKCJA PIERWOTNA FIORDU EZCURRA W OKRESIE ANTARKTYCZNEGO LATA 1977/78

Streszczenie

Celem badań było określenie produktywności pierwotnej i koncentracji chlorofilu *a* w toni wodnej fiordu Ezcurre i scharakteryzowanie optycznych uwarunkowań procesu fotosyntezy w tym akwenie. Badania eksperymentalne przeprowadzono podczas II Polskiej Wyprawy Antarktycznej, z motorowca „Antoni Garnuszewski” zakotwiczonego w ustalonym centralnym miejscu fiordu Ezcurre.

Pomiary produktywności pierwotnej wykonano in situ metodą izotopową z węglem C^{14} [7, 4], natomiast koncentracje chlorofilu *a* określono metodą spektrofotometryczną stosując wzór Stricklanda — Parsonsa [8].

Wyznaczone wielkości całodziennych produkcji pierwotnych w jednostce objętości wody morskiej, wyrażone w jednostkach wagowych zasymilowanego węgla, oraz koncentracje chlorofilu *a* na poszczególnych głębokościach w morzu — podane są w tabl. 1 i 2.

Na rys. 1A przedstawione są przykładowe, skrajne i pośrednie pionowe rozkłady całodziennych produkcji pierwotnych — $P_d(z)$. Jak widać, w większości wypadków obserwowano wyraźne maksimum pionowych rozkładów intensywności fotosyntezy, przypadające na różne głębokości w warstwie powierzchniowej od 0 do 7 m. Najczęściej maksimum to obserwowano na głębokości $z=5$ m. Uśredniony ze wszystkich pomiarów pionowy rozkład intensywności fotosyntezy ilustruje rys. 1B.

Przez scałkowanie numeryczne po głębokości krzywych $P_d(z)$ określono całkowite dzienne produkcje pierwotne w słupie wody pod jednostkową powierzchnią — P_{ds} , opisujące globalnie proces fotosyntezy w toni wodnej. Wielkości produkcji, P_{ds} podane są w kol. 2 tab. 3. Jak widać, produktywność pierwotna toni wodnej fiordu Ezcurre silnie fluktuowała w okresie badań. W skrajnych przypadkach całodziennie produkcje różniły się ok. 10-krotnie, a ich bezwzględne wielkości wahały się od 150 do 1500 mgC/m²d. Średnia z zaobserwowanych produkcji wynosiła: $\bar{P}_{ds} = 665$ mgC/m²d z odchyleniem standardowym $\delta_p = 332$ mgC/m²d. Wielkość średniej wskazuje, że

produktywność pierwotna fiordu Ezcurre przewyższa podobne produktywności otwartych wód oceanicznych w rejonie Szetlandów Południowych (por. np. z danymi w pracy [3]), jest natomiast porównywalna z produktywnością wód bałtyckich w okresie letnim (por. z danymi z prac [5, 6]).

W kol. 3 tab. 3 podane są średnie w warstwie 0—30 m koncentracje chlorofilu $a - \bar{B}$, wyznaczone na podstawie danych z tab. 1. Jak widać, w skrajnych wypadkach koncentracje — \bar{B} różniły się ok. 6-krotnie i przyjmowały wartości w granicach od 0,54 do 3,62 mg/m³. Natomiast odpowiednia wartość średnia ze wszystkich obserwacji wynosiła: $\bar{B} = 1,18$ mg/m³ z odchyleniem standardowym $\delta_B = 0,58$ mg/m³.

Obserwowane w badanym okresie, silne zróżnicowanie w czasie intensywności fotosyntezy wywołane było fluktuacjami szeregu abiotycznych i biotycznych warunkowań produktywności pierwotnej morza. Jednym z najważniejszych czynników wpływających bezpośrednio na bezwzględne wielkości produkcji pierwotnej są aktualne koncentracje biomasy fitoplanktonu w morzu (reprezentowane tu przez zawartość chlorofilu a) i warunki oświetleniowe toni wodnej. W analizowanym wypadku oba te czynniki charakteryzowały się znacznymi zmiennościami w czasie (które w odniesieniu do warunków oświetlenia powierzchni i wnętrza akwenu omówiliśmy w poprzednim artykule niniejszego tomu).

Parametrem charakteryzującym wpływ oświetlenia i koncentracji fitoplanktonu na globalny efekt procesu fotosyntezy w toni wodnej jest wydajność energetyczna produkcji pierwotnej, opisana tu uproszczoną zależnością:

$$r = P_{ds} / \bar{B} \cdot \eta_p,$$

gdzie η_p jest całodzienną dawką energii promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię morza (zob. kol. 4 tab. 3). Obliczone dla poszczególnych dni wielkości wydajności produkcji pierwotnej w morzu — r (kol. 5 tab. 3), wskazują na pewną ich korelację z nasłonecznieniem. Zauważalna jest bowiem tendencja spadkowa wielkości parametru — r , ze wzrostem energii η_p (zob. rys. 2), przy czym zależność ta ma charakter hiperboliczny. Położenie punktów eksperymentalnych na diagramie powyższej zależności przybliżono empirycznym wzorem uzyskanym metodą najmniejszych kwadratów:

$$\log r = -1,16 \log \eta_p + 3,363$$

gdzie: r — wydajność w jednostkach (mgC · m³/mg Chl · kJ), a η_p w jednostkach (kJ/m²).

Stosunkowo duży rozrzut punktów eksperymentalnych powyższej zależności spowodowany jest przyjętymi przybliżeniami, zróżnicowaniem w czasie i przestrzeni szeregu innych — nie uwzględnionych tu — abiotycznych i biotycznych czynników środowiskowych, warunkujących proces fotosyntezy. Szczegółowa analiza wpływu tych czynników na wydajność energetyczną produktywności pierwotnej fitoplanktonu morskiego, jest przedmiotem dalszych badań autorów.

REFERENCES

1. Gargas, E., *A Manual for phytoplankton primary production studies in the Baltic*, BMB, 1975, Publ. 2.

2. Gargas, E., I. Hare, *User's manual for estimating the daily phytoplankton production measured in an incubator*, Contr. Water Qual. Inst. 2, 1976.
3. Mandelli, F., P. R. Burkholder, *Primary productivity in the Gerlache and Bransfield Straits of Antarctica*, J. Marine Res., 1966, vol. 24, 1.
4. Renk, H., *Aparatura do wyznaczania bezwzględnej aktywności węgla w badaniach produkcji pierwotnej*, Studia i Materiały MIR, 1970, 6.
5. Renk, H., *Produkcja pierwotna toni wodnej południowego Bałtyku*, Studia i Materiały MIR, 1973, 12.
6. Schultz, S., W. Kaiser, *Produktionsbiologische Untersuchungen in der Ostsee*, Fischerei-Forschung, 1974, 12.
7. Steeman-Nielsen, E., *The use of radioactive carbon C-14 for measuring organic production in the sea*, J. Cons. Int. Explor. Mer, 1952, 18.
8. Strickland, J. D. H., T. R. Parsons, *A practical handbook for seawater analysis*, Bull. Fish Res. Bd. Can., 1968, 167.

Manuscript received in 1979