

***Взаимосвязь параметров  
фитопланктона с глубиной верхнего  
квазиоднородного слоя***

**Захарков С.П., Гордейчук Т.Н., Штрайхерт Е.А.,  
Шамбарова Ю.В.**

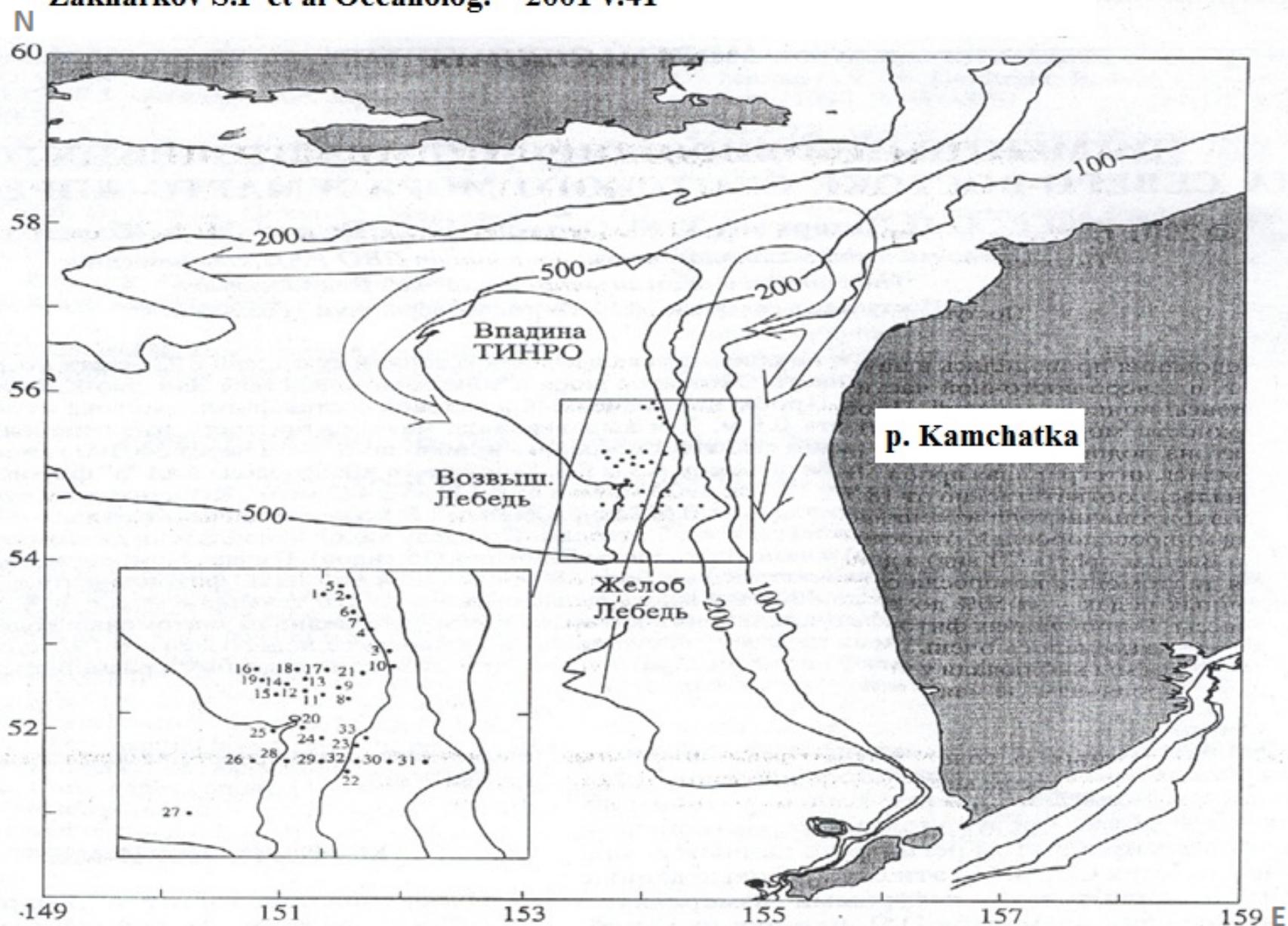
(Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН ,  
Владивосток, e-mail: [zakharkov@poi.dvo.ru](mailto:zakharkov@poi.dvo.ru))

## ВКС и его значение

- **Изучение глубины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) морских вод важно для различных отраслей народного хозяйства. ВКС является связующим звеном между атмосферой и океанскими глубинами и напрямую влияет на обмен тепла «воздух-море». Таким образом, глубина перемешанного слоя имеет очень большое значение для определения температуры в океанических и прибрежных районах. ВКС является ключевым компонентом при изучении климата. С другой стороны, ВКС - это та часть океана, через которую оказывается непосредственное влияние океана на атмосферу. Кроме того, турбулентные течения в перемешанном слое влияют на биологическую продуктивность путем контроля питательных веществ в верхнем слое и солнечной освещенности фитопланктона. В этих исследованиях заинтересована рыбная промышленность при изучении распределения рыбных и нерыбных ресурсов. Особенное значение изучение ВКС играет для военно-морского флота (определение структуры распространения скорости звука по глубине для определения местонахождения подводных лодок и мин) и загрязнения морской среды.**
- **Если следовать определению верхнего перемешанного слоя согласно (Thompson R. Climatological models of the surface mixed layer of the ocean // J. Phys. Oceanogr. 1976. V. 6. P. 496-503), то глубина ВКС определяется как глубина, на которой разность между поверхностной температурой и температурой на границе перемешанного слоя не превышает заранее заданного значения. Автор задает такое значение равным  $0.2^{\circ}\text{C}$ . Возможен выбор и другого критерия, например,  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Тогда расчетная глубина верхнего перемешанного слоя будет немного отличаться.**

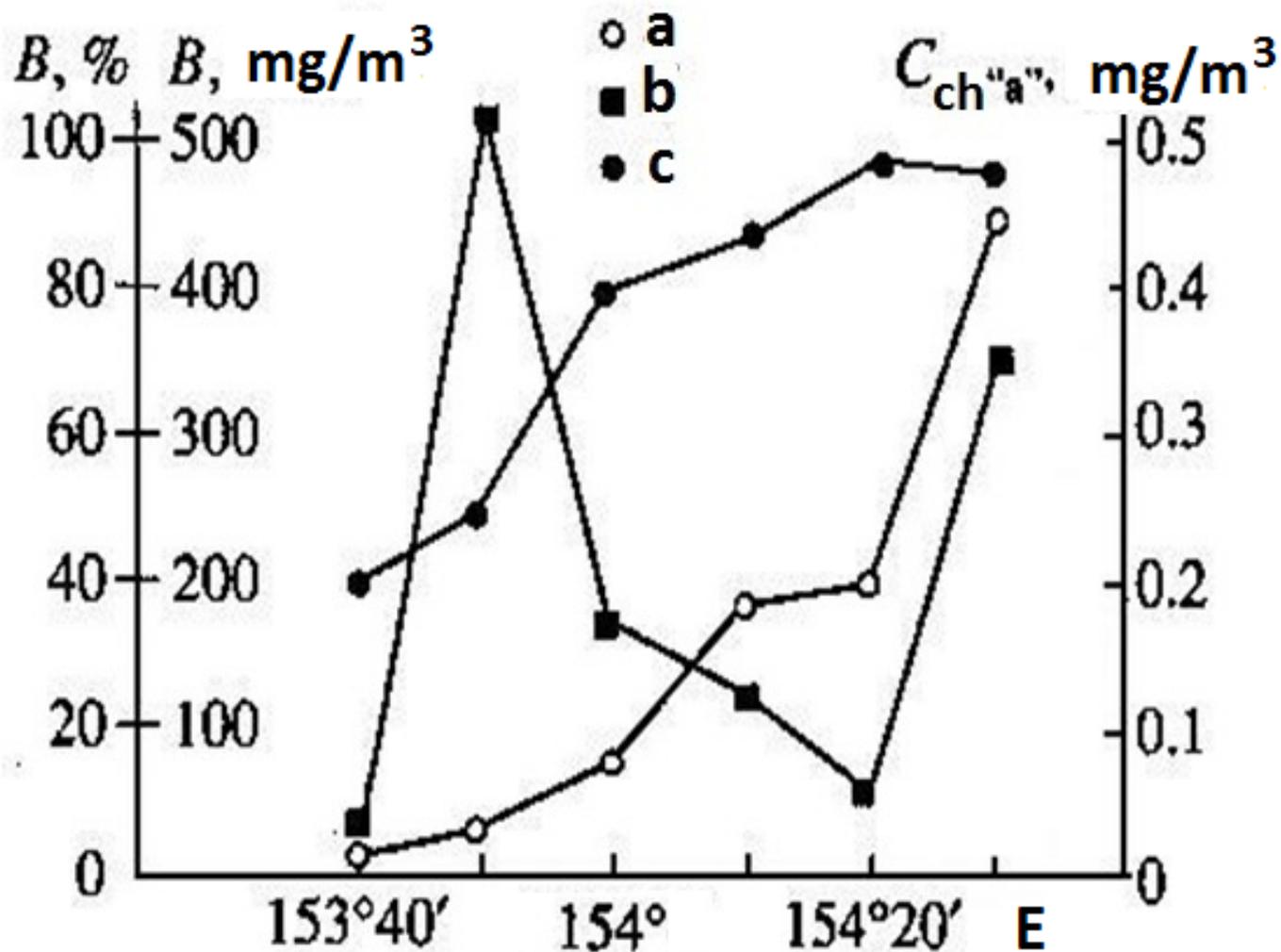
Таблица 2. Биомасса фитопланктона северо-восточной части Охотского моря

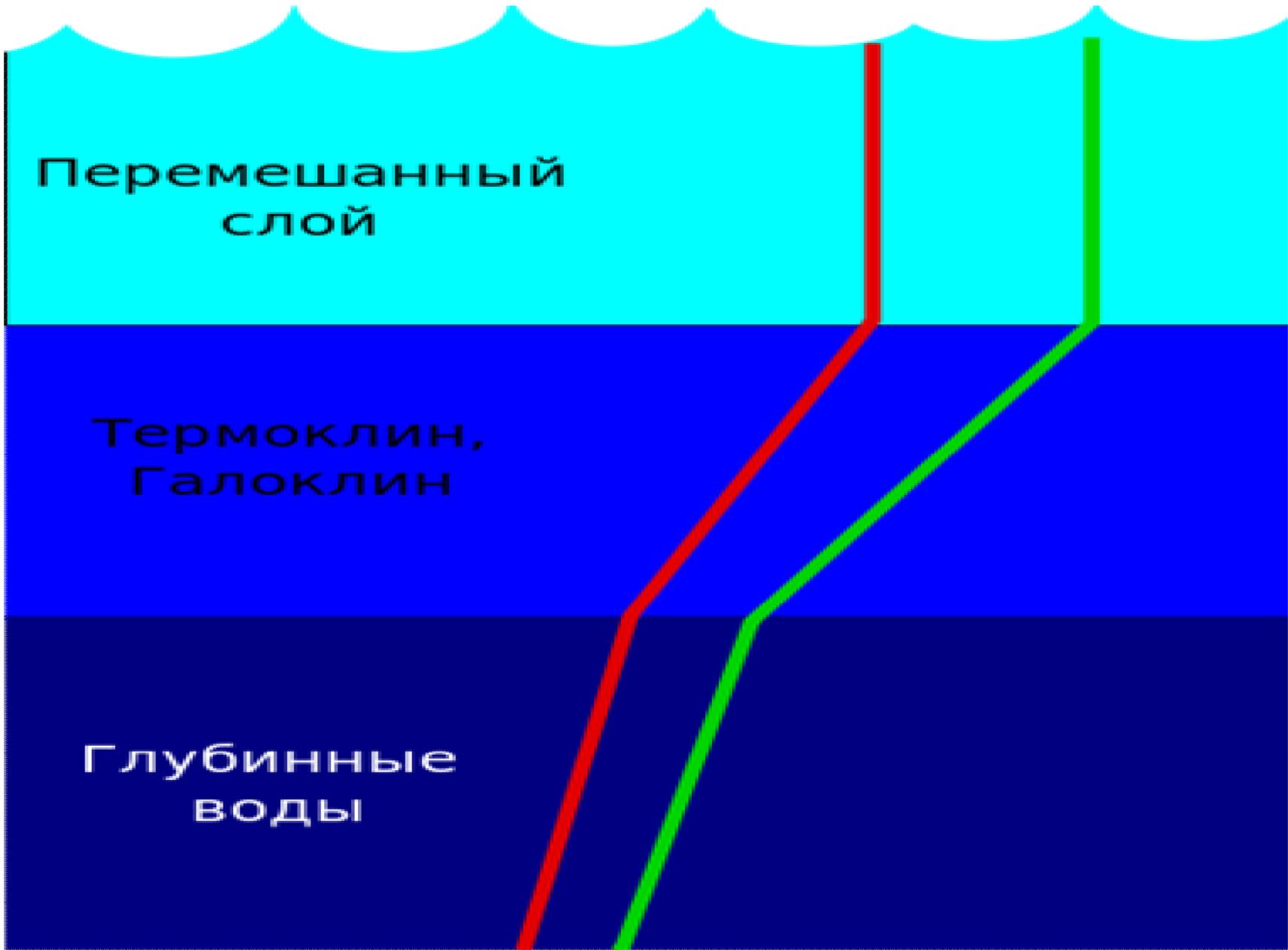
№ станций	Общая, мг/м <sup>3</sup>	Биомасса в % от общей					
		диатомей	перицинеи	золотист	крипто-фитовые	мелкие жгутиковые	эвгленовые
1	54	75	20.9	0.9	1.1	0.4	1.3
2	102	61.7	27.2	1.6	1.3	7.6	0.7
3	107.8	84.3	11.6	1.6	1	1.3	0.3
4	56.7	88.2	8.1	0.5	0.4	1.2	1.6
8	96.7	54.2	32	3.7	2.4	4.1	2.6
11	99.9	50	40	-	2.9	6.6	0.5
17	71.6	57.8	34.9	-	1.4	2.1	3.8
22	61.3	80.7	14.7	0.3	1.1	2.3	0.8
23	45.1	30.8	54.1	0.7	4.2	6.4	3.8
24	51.8	47.9	41.7	1.7	1.5	5.2	1.9
25	22.3	23.8	55.6	3.1	3.6	13.5	0.5
26	18.7	42.3	51.9	2.7	1.6	1.6	-
27	79	79	16.2	-	1	1.3	2.5
28	48.7	50.9	37.8	1	1.6	2.9	5.8
29	46.6	82.6	15.2	-	0.2	0.7	1.3
30	212.5	89.8	7.5	1	0.4	0.9	0.4
31	490.9	98.2	1.5	-	0.1	0.2	-
32	193	94.6	4.1	-	0.2	0.7	0.5



The scheme of circulation of a northeast part of sea of Okhotsk. The rectangle designates area of works. On insert are specified positions and numbers of hydrobiological stations in March-April, 1998 are resulted

- a-  $B, \text{mg/m}^3$  – биомасса фитопланктона ( $\text{mg/m}^3$ );
- b-  $C_{\text{ch "a"}}$   $\text{mg/m}^3$  концентрация хлорофилла "а" ( $\text{mg/m}^3$ );
- c-  $B, \%$  биомасса диатомей в % от общей биомассы фитопланктона

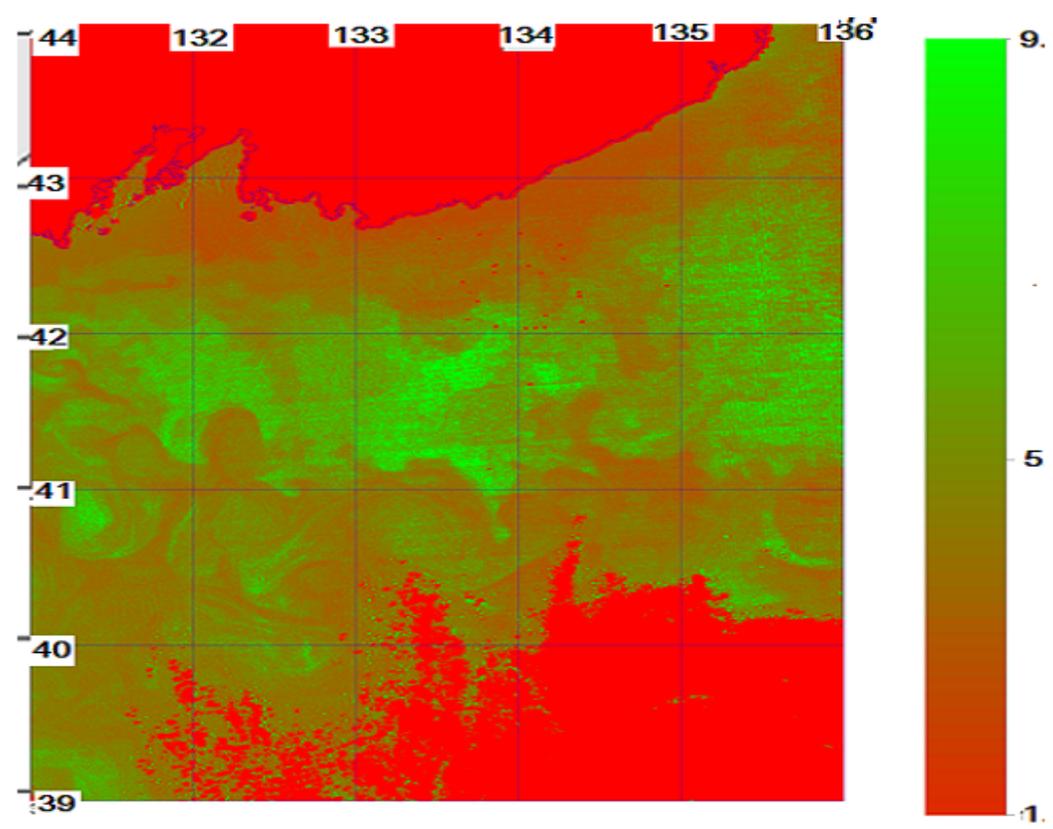
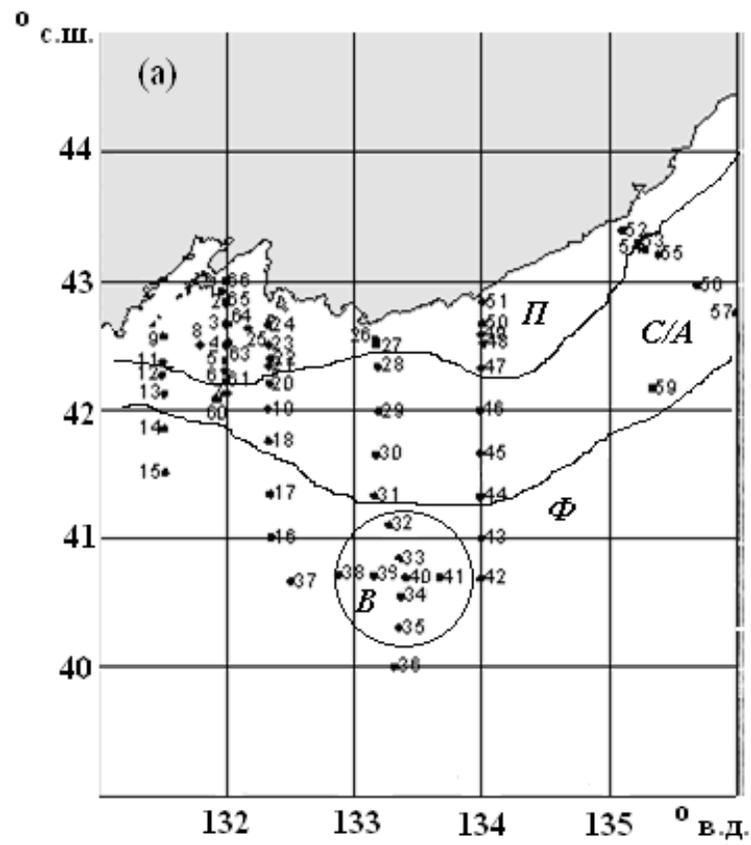




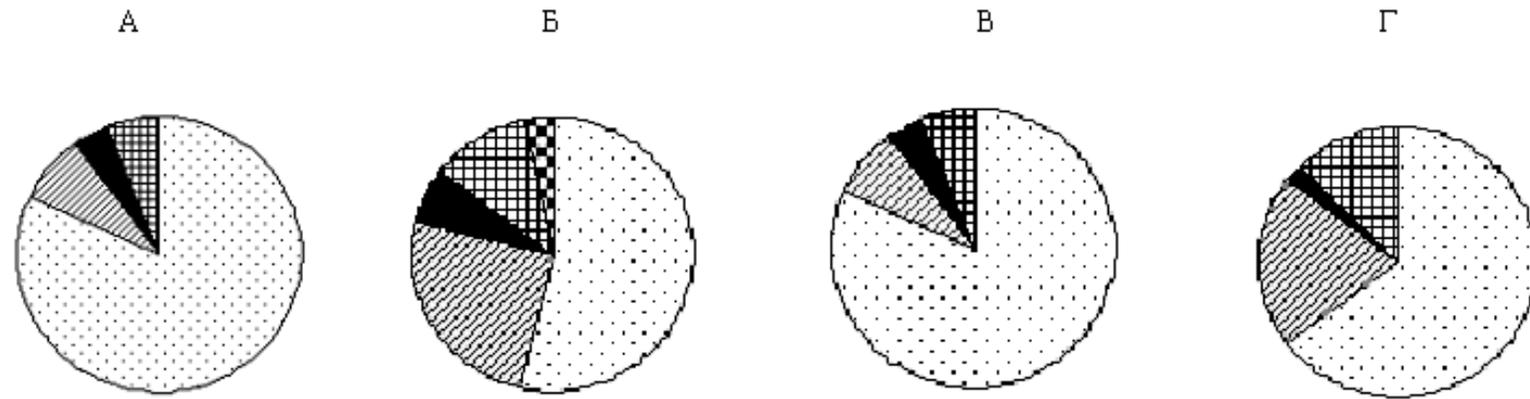
температура  
солёность



- При изучении распределения концентрации Хл и (БМ) водорослей в Японском море по судовым данным 30-го рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев», проходившего в период с 26 февраля по 9 марта 2003 года, было выявлено, что отношение ХЛ/БМ наиболее велико на станциях с глубоким ВКС. На этих станциях преобладали более легкие виды микроводорослей. По сравнению с прибрежными станциями, имеющими небольшую глубину ВКС, наблюдалась смена доминирующих групп диатомовых водорослей на динофитовые и мелкие жгутиковые. Численность диатомовых в прибрежной зоне достигала 81% от общей численности фитопланктона, более мелкие формы - динофитовые, золотистые и мелкие жгутиковые водоросли составляли всего 8%, 4% и 6% соответственно. При этом коэффициент корреляции между процентом численности диатомовых водорослей и глубиной перемешанного слоя был значимым и отрицательным при доверительной вероятности 0,99. На станциях с высоким ВКС численность диатомей снизилась до 51%, на долю динофитовых приходилась четверть численности клеток фитопланктона (24%) – это в 3 раза выше, чем в прибрежной зоне. Процент численности золотистых и мелких жгутиковых составил 7% и 11% соответственно, что практически в два раза выше, чем в прибрежной зоне. Средний вес на одну клетку диатомовой водоросли в прибрежной зоне составил 56 нг, с увеличением ВКС он снизился до 37 нг.



Численность основных классов микроводорослей фитопланктона (в процентах) в изученных зонах северо-западной части Японского моря.



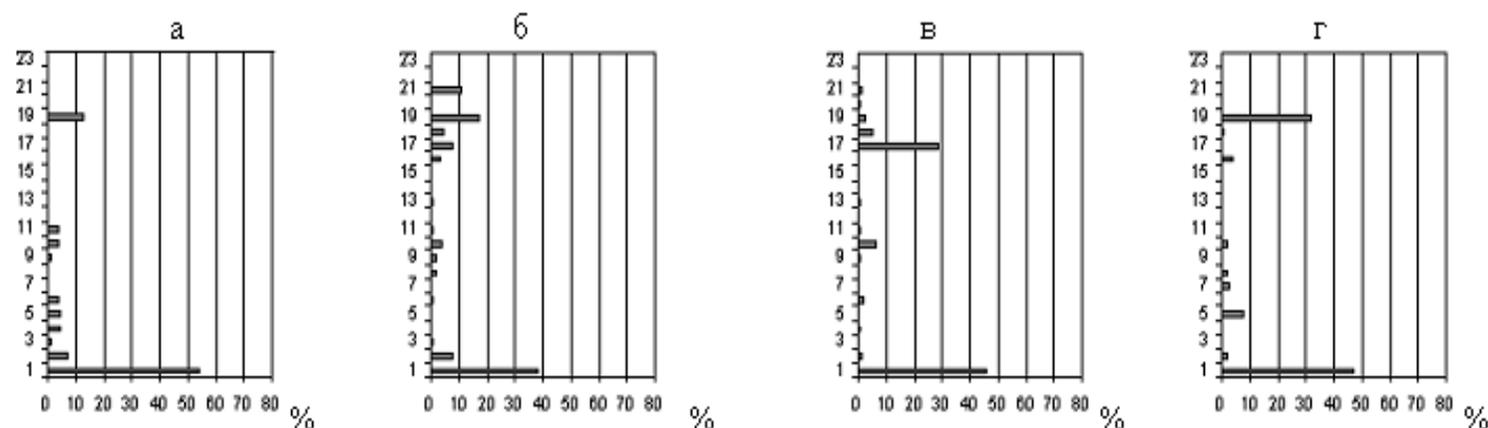
Условные обозначения:

а – прибрежная зона, б – субарктическая, в – фронтальная, г – вихрь

⋯ - Bacillariophyta    ▨ - Dinophyta    ■ - Chrysophyta    ▩ - Мелкие жгутиковые  
⊘ - Euglenophyta + Cryptophyta

Зоны	ХЛ/БМ*1000	% диатомовых	ВКС	Эвфотическая зона
Прибрежная (31)	5.7	80.3	76 ± 27.41	60 ± 12.01
Субарктическая (19)	7.5	52	137 ± 68.53	70 ± 8.87
Фронтальная (8)	4.5	74	71 ± 33.15	64 ± 14.42
Область вихря (7)	11.5	60.1	125.3 ± 71.7	63.86 ± 11.81
Центр (3)	9.3	65.5	179 ± 44.7	
Периферия (4)	13.2	56.1	85 ± 62	

## Распределение численности и биомассы видов диатомей в % от общих значений этих параметров



Примечание: а – прибрежная зона, б – субарктическая зона, в - фронтальная зона, в - вихрь, где цифрами по оси ординат указаны следующие виды: 1. *Talassiosira nordenskiöldii*, 2. *Navicula* sp., 3. *Corethron cryophilum*, 4. *Dactyliosolen fragilissimus*, 5. *Guinardia striata*, 6. *Thalassionema nitzschioides*, 7. *Proboscia alata*, 8. *Cylindrotheca closterium*, 9. *Chaetoceros* sp., 10. *C. decipiens*, 11. *Pseudonitzschia pungens*, 12. *Nitzschia longissima*, 13. *Tropidoneis antarcticum*, 14. *Stephanopyxis nipponica*, 15. *Rhizosolenia hebetata* f. *hiemalis*, 16. *Coscinodiscus oculus-iridis*, 17. *C. debilis*, 18. *C. concavicornis*, **19. *Chaetoceros atlanticus***, 20. *Navicula transitans* var. *derasa* f. *delicatula*, 21. *Asterionellopsis gracillima*, 22. *Rhizosolenia setigera*, 23. *Pleurosigma formosum*

**Table. 1.1 Distribution of a chlorophyll a (Chl), a phytoplankton biomass (BM), the relation of a chlorophyll a to a biomass, diatoms algae percent from total of algae (defined on ship data), the total suspended matter substance (tsm clark) and differences between last parameter and a biomass**

St	longitude (°E)	latitude (°N)	depth m	Chl mg/m <sup>3</sup>	BM mg/m <sup>3</sup>	Chl/BM x 1000	diatoms %	tsm clark mg/l	tsm clark- BM(mg/l)
1	131,96	42,92	58	3,6	57063	0,06	99,60	0,79	-56,27
2	132,00	42,82	72	1,56	39313,7	0,04	99,85	0,76	-38,55
3	132,00	42,66	76	0,61	15958,9	0,04	99,33	0,65	-15,31
4	132,00	42,49	97	0,62	639,5	0,97	94,74	0,41	-0,23
5	131,99	42,38	880	0,43	57,6	7,47	36,37	0,36	0,30
6	131,99	42,30	2327	0,35	16,2	21,60	33,33	0,37	0,35
7	132,01	42,12	2778	0,34	36,5	9,32	92,30	0,34	0,30
8	131,80	42,50	68	0,46	820,7	0,56	93,98	0,43	-0,39
9	131,51	42,57	75	0,88	36073,5	0,02	99,83	0,52	-35,55
11	131,50	42,37	682	0,33	407	0,81	96,68	0,37	-0,04
12	131,50	42,27	1710	0,67	2971,2	0,23	99,21	0,4	-2,57
13	131,52	42,12	2737	0,3	170,3	1,76	53,84	0,34	0,17
14	131,51	41,85	3066	0,45	421,1	1,07	88,37	0,34	-0,08
15	131,52	41,51	3252	0,58	639,3	0,91	97,66	0,34	-0,30
16	132,35	41,01	3074	0,47	138,3	3,40	86,47	0,35	0,21
17	132,35	41,34	3386	0,45	66,1	6,81	63,64	0,34	0,27
18	132,33	41,75	1620	0,3	25,8	11,63	50,00	0,3	0,27
19	132,33	42,00	2777	0,24	28,6	8,39	50,00	0,34	0,31
20	132,34	42,20	2756	0,38	145,3	2,62	50,00	0,34	0,19
21	132,34	42,34	1746	0,28	123,6	2,27	85,71	0,37	0,25
22	132,35	42,39	562	0,34	7,8	43,59	50,00	0,37	0,36

Table. 1. Distribution of a chlorophyll  $\alpha$  (Chl), a phytoplankton biomass (BM), the relation of a chlorophyll  $\alpha$  to a biomass, diatoms algae percent from total of algae (defined on ship data), the total suspended matter substance (tsm clark) and differences between last parameter and a biomass

St	longitude (°E)	latitude (°N)	depth m	Chl mg/m <sup>3</sup>	BM mg/m <sup>3</sup>	Ch/BM x 1000	diatoms %	tsm clark mg/l	tsm clark- BM(mg/l)
23	132,34	42,50	100	-	1064,8	0,00	98,91	0,46	-0,60
24	132,33	42,65	88	1	4096,6	0,24	98,83	0,57	-3,53
25	132,17	42,63	98	0,67	881,9	0,76	96,34	0,65	-0,23
26	133,17	42,54	622	0,35	203,3	1,72	75,00	0,38	0,18
27	133,17	42,50	1353	0,17	138,2	1,23	66,00	0,37	0,23
28	133,19	42,33	2440	0,54	28,3	19,08	43,48	0,35	0,32
29	133,20	41,98	3400	0,37	38,3	9,66	69,25	0,31	0,27
30	133,17	41,65	3444	0,33	176,4	1,87	57,89	0,3	0,12
31	133,16	41,33	3441	0,2	31,3	6,39	19,99	0,29	0,26
32	133,34	41,09	3300	0,72	60	12,00	39,53	0,35	0,29
33	133,36	40,84	3420	0,58	24,3	23,87	58,33	0,32	0,30
35	133,35	40,31	3319	1,07	51,5	20,78	31,59	0,73	0,68
36	133,32	40,00	2352	0,74	60,1	12,31	34,89	0,37	0,31
37	132,51	40,67	3366	0,48	217,8	2,20	66,67	0,35	0,13
38	132,88	40,72	3390	0,3	16,5	18,18	100,00	0,34	0,32
39	133,16	40,72	3400	0,3	358,5	0,84	73,91	0,34	-0,02
40	133,41	40,69	3416	0,24	76,9	3,12	64,27	0,32	0,24
41	133,67	40,70	3440	0,25	142,2	1,76	53,34	0,32	0,18
42	133,99	40,69	3455	0,5	62,8	7,96	84,09	0,35	0,29
43	134,00	41,00	3480	0,11	27	4,07	69,99	0,32	0,29
44	133,99	41,32	3484	0,22	33,1	6,65	69,24	0,33	0,30

Table. 1. 1 Distribution of a chlorophyll a (Chl), a phytoplankton biomass (BM), the relation of a chlorophyll a to a biomass, diatoms algae percent from total of algae (defined on ship data), the total suspended matter (tsm clark) and differences between last parameter and a biomass

St	longitude (°E)	latitude (°N)	depth m	Ch mg/m <sup>3</sup>	BM mg/m <sup>3</sup>	Ch/BM x 1000	diatoms %	tsm clark mg/l	tsm clark- BM(mg/l)
45	133,99	41,66	3488	0,22	57,8	3,81	62,54	0,29	0,23
46	133,98	41,99	3326	0,33	15	22,00	0,00	0,31	0,30
47	133,99	42,32	3314	0,38	41,2	9,22	31,57	0,32	0,28
48	134,01	42,51	1821	0,3	58,8	5,10	64,10	0,34	0,28
49	133,99	42,58	1136	0,38	50,7	7,50	73,59	0,35	0,30
50	134,00	42,67	284	0,2	37,5	5,33	71,18	0,37	0,33
51	134,00	42,83	125	0,5	293,1	1,71	93,58	0,42	0,13
52	135,10	43,39	103	0,34	31,7	10,73	94,78	0,37	0,34
53	135,22	43,30	455	0,52	200	2,60	81,91	0,34	0,14
54	135,28	43,25	1312	0,36	37,8	9,52	44,46	0,35	0,31
55	135,38	43,20	3339	0,8	152,5	5,25	63,90	0,34	0,19
56	135,69	42,96	3460	0,3	80,1	3,75	33,99	0,32	0,24
57	135,99	42,75	3365	0,22	145,3	1,51	36,20	0,32	0,17
58	136,28	42,61	1415	0,19	22,7	8,37	77,28	-	-0,02
59	135,33	42,17	3590	0,22	23,8	9,24	30,00	0,29	0,27
60	131,92	42,08	1496	0,26	23,7	10,97	76,96	0,34	0,32
61	132,00	42,22	2675	0,38	14,3	26,57	24,98	0,34	0,33
63	132,00	42,50	98	2,04	14339,2	0,14	98,60	0,41	-13,93
64	132,00	42,67	70	0,4	28138	0,01	99,47	0,73	-27,41
65	132,00	42,84	71	0,57	27414,7	0,02	98,90	0,76	-26,65
66	132,00	43,00	40	0,73	14864	0,05	97,82	0,76	-14,10

- Исходя из этого, нами было введено понятие «хлорофилльного индекса».
- Хлорофилльный индекс (Ichl) показывает отношение ХЛ, определенного спутниковым методом, к биомассе, определенной с помощью алгоритма Кларка (tsm Clark). За биомассу принималась величина, равная общей взвеси, определенной по спутниковым данным, за вычетом неорганических и органических взвешенных частиц, определенных эмпирически. Эта взвесь вычислялась как разница между общим взвешенным веществом и биомассой микроводорослей, определенных по судовым данным. Для открытых районов Японского моря в зимний период она составляла около 0,25 мг/л. Это позволило нам составить простое уравнение для характеристики распределения водорослей.
- $I_{chl} = chl_{oc} / (tsm_{clark} - 0.25)$
- Были проанализированы данные по общему взвешенному веществу (ОВВ), полученные в нашем институте по судовым данным и данные по алгоритму Clark (tsm clark), рассчитанные по спутниковым данным для одних и тех же точек. Сравнение показало удовлетворительную связь. Коэффициент корреляции был значимым для доверительного интервала 0,999, что подтверждает возможность использования алгоритма Clark для определения концентрации общей взвеси в исследуемом районе. Отношение между средними значениями этих параметров (взвесь по судовым и взвесь по спутниковым данным) составило 0,67 (Джонсон, Лион, Изд. «Мир» М., 1980г, с. 560).
- Столь большая разница объясняется различными национальными стандартами по определению взвеси в природных водах принятых в России и США
- Также было установлено, что экспериментальные измерения концентрации хлорофилла и концентрации хлорофилла, определенные спутниковыми дистанционными методами, согласуются между собой, что позволяет использовать спутниковые данные по концентрации хлорофилла для оценочной характеристики распределения фитопланктонного сообщества (Hooker S.B. Meclain C.R. The calibration and validation of SeaWIFS data//Progress in Oceanography 2000 Vol. 45.№3-4 p 427-465).

- Вычисления осуществляются следующим образом:
- По данным, полученным в ходе рейса или по буям Арго, расположенным в исследуемом море в нескольких точках с известными координатами определяют экспериментально глубину ВКС. Для этих же точек с использованием, например, спутниковых данных, которые ежедневно выставляются на сайте НАСА (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>), используя алгоритм Clark, вычисляют концентрацию хлорофилла и концентрацию общей взвеси, а также определяют концентрацию биомассы водорослей, равную концентрации общей взвеси за вычетом концентрации неорганических взвешенных частиц, которая определена предварительно эмпирически, и равна 0.25. По этим данным вычисляют хлорофильный индекс для данных точек по формуле
- $I_{chl} = chl_{oc} / (tsm_{clark} - 0.25)$
- Затем по методу наименьших квадратов составляют линейное регрессионное уравнение зависимости глубины ВКС от хлорофильного индекса вида:  $НВКС = K I_{chl} + B$ , решая которое вычисляют коэффициенты  $K$  и  $B$ , где коэффициент  $K$  показывает на сколько метров меняется глубина ВКС при изменении хлорофильного индекса на единицу, а коэффициент  $B$  - глубину ВКС при нулевом значении хлорофильного индекса.
- Так например, и для Японского моря по экспериментально полученным данным в ходе экспедиции и для Берингова моря по буям Арго были определены  $K$ , равные, соответственно, 5.61м и 19.98м и  $B$ , равные, соответственно, 71м и 13м.
- Найденные значения коэффициентов  $K$  и  $B$  считают постоянными для данных морей, т.к. корреляция между глубиной ВКС и хлорофильным индексом положительна и значима при доверительном интервале 0,999 и используют далее для оценки глубины верхнего квазиоднородного слоя на всей акватории исследуемого высокоширотного моря в зимний период по величинам хлорофильного индекса  $I_{chl}$ , который вычисляют по данным концентраций общей взвеси и хлорофилла, полученных дистанционным методом, например с сайта НАСА.
- $НВКС = K I_{chl} + B$

- Для примера была рассмотрена такая мезомасштабная гидрологическая структура как антициклонический вихрь в северо-западной части Японского моря с координатами центра вихря  $133.5^\circ$  восточной долготы и  $40,7^\circ$  северной широты. Для центральной части вихря концентрация хлорофилла и концентрация общей взвеси определённая дистанционным методом, по спутниковым данным, с использованием алгоритма Clark составили, соответственно  $0,387\text{мг/м}^3$  и  $0,327\text{мг/л}$ . Для периферии вихря эти параметры были равны для хлорофилла  $0,481\text{мг/м}^3$ , концентрации общей взвеси  $0,371\text{ мг/л}$ . Произведя вычитание концентрации неорганических взвешенных частиц, которую считают постоянной величиной для высокоширотных морей в зимнее время и равной  $0.25\text{ мг/л}$ ., и разделив концентрацию хлорофилла на концентрацию биомассы водорослей находим хлорофильный индекс, равный для центра и периферии вихря  $5.03$  соответственно, и  $3.98$ . Подставляя рассчитанные значения хлорофильного индекса и предварительно вычисленные по Японскому морю значения коэффициентов  $K$  и  $B$ , соответственно равные  $19.98\text{м}$  и  $13\text{м}$  (в формулу  $\text{НВКС} = K \cdot \text{chl} + B$ , получаем средние значения глубины ВКС для центральной части и периферии вихря соответственно.  $\text{НВКС} = 19.98 \cdot 5.03 + 13 = 113,5\text{ м}$ . и  $\text{НВКС} = 11.98 \cdot 3.98 + 13 = 92.6\text{ м}$ .
- Квазисинхронные экспериментальные измерения глубины ВКС, выполненные на 3-х станциях в центре и на 4-х станциях периферии вихря показали соответственно следующие значения:  $125.3 \pm 71.7\text{м}$  и  $85 \pm 62.4\text{м}$ .
- Как показал статистический анализ результатов, полученных для акватории Японского моря, среднеквадратическое отклонение восстановленных значений глубин нулевой изотермы от их значений, определенных по данным зондирования, оказывается порядка  $20\%$ , то есть погрешность предлагаемого способа соизмерима с погрешностью экспериментального зондирования, однако при реализации способа не требуется выполнять большое количество дорогостоящих рейсов, а достаточно использовать данные, например, с регулярно действующих искусственных спутников Земли.
- Таким образом, предлагаемый способ является перспективным и может найти широкое практическое применение для оценки глубины верхнего квазиоднородного слоя высокоширотных морей в зимний период.

# Выводы

- За последние 15 лет выполнен большой объём исследований по связи параметров фитопланктона с гидрологическими условиями в ДВ морях России.
- Открыта взаимосвязь между параметрами фитопланктона и глубиной ВКС
- На основе этого явления разработан и патентуется метод оценки глубины ВКС в зимнее время в высокоширотных морях

*Благодарю за  
внимание*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Алексанин А.И., Орлова Т.Ю., Фомин Е.В., Шевченко О.Г. Перспективы определения видового состава фитопланктона по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научных статей. - М.:ООО «Азбука-2000», 2008. - Т. 2, вып. 5. - С. 22-29.
- Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. - М.: Мир, 1980. - 510с.
- Захарков С.П., Орлова Т.Ю., Ванин Н.С., Штрайхерт Е.А. Пигментный и видовой состав фитопланктона на северо-востоке Охотского моря в марте-апреле 1998 г. //Океанол. - 2001. Т.41, №5. - С. 711-718.
- Захарков С.П., Лобанов В.Б., Гордейчук Т.Н. и др. Пространственная изменчивость хлорофилла а и видового состава фитопланктона в северо-западной части Японского моря в зимний период.  
// Океанол. №2 2012 (в печати).
- Орлова Т.Ю. Диатомовые водоросли планктона неритических вод Южного Приморья // Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - Владивосток: ИБМ ДВО АН СССР. - 1990. - 26 с.
- Пырина И.Л., Елизарова В.А. Спектрофотометрическое определение хлорофилла а в культурах некоторых водорослей // Биология и продуктивность пресноводных организмов. Л.: Наука, 1971. - С.56-66.
- Alvain S., Moulin C., Dandonneau Y., Bre'lon F.M. Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery // Deep-Sea Research. I. – 2005. - Vol. 52. - P. 1989–2004.
- Darley W.M. Biochemical composition // The biology of diatoms. Bot. Monog. / Ed. Werner D.V.