

**АНАЛИЗ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА-А В АМУРСКОМ ЛИМАНЕ  
И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ВОДАХ МЕТОДОМ ЕСТЕСТВЕННЫХ  
ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ  
СИСТЕМЫ TERASCAN ЗА 2001–2004 ГГ.**

**Ж. Р. Цхай**

*Сахалинский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства  
и океанографии, ул. Комсомольская, 196, Южно-Сахалинск, 693023, Россия.  
E-mail: janet@sakhniro.ru*

Описаны сезонная динамика и распределение концентрации хлорофилла-а на акватории Амурского лимана. Проведена оценка общего содержания вещества в воде в зависимости от времени года. Определены факторы, влияющие на распределение и динамику концентрации пигмента.

**ANALYSIS OF SEASONAL VARIABILITY OF CHLOROPHYLL-A  
CONCENTRATION IN AMUR FIRTH AND CONTIGUOUS WATER BY EOF  
ON TERASCAN SATELLITE DATA FOR 2001–2004 YEARS**

**Zh. R. Tshay**

*Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography, Komsomolskaya st., 196, Yuzhno-Sakhlinsk,  
693023, Russia. E-mail: janet@sakhniro.ru*

Seasonal variations and distribution of chl-a concentration were described in Amur firth. The total contents of pigment in water was estimate. The factors which determine variations and distribution of chl-a concentration were found.

**Введение**

Амурский лиман расположен между Татарским проливом Японского моря и Сахалинским заливом Охотского моря. С запада в него впадает р. Амур. Процесс сложного взаимодействия речных, охотоморских и япономорских вод обуславливает особенности распределения фитопланктона в Амурском лимане. Результаты по исследованию фитопланктона в данном водоеме описаны И.А. Киселевым в 30 годах XX века. Важный продукционный показатель фитопланктона – концентрация хлорофилла-а. Наиболее обычным является измерение содержания хлорофилла-а гидрохимическими натурными методами, что связано с необходимостью экспедиционных исследований (как правило, летних). Поэтому в труднодоступных для исследователей районах невозможны сезонные исследования этого параметра (Вентцель и др., 2000; Distribution..., 2004).

В последнее время все большую актуальность приобретает возможность определения поверхностной концентрации хлорофилла-а дистанционными методами, преимуществом которых является регулярность получения информации на заданной акватории (Shtraikhert, Zakharkov, 2004).

Цель данной работы – проанализировать пространственное распределение, а также сезонную и межгодовую изменчивость концентрации хлорофилла-*a* в Амурском лимане на основе спутниковых данных, полученных станцией TeraScan в 2001–2004 гг. Исходя из поставленной цели определены следующие задачи:

- анализ сезонной изменчивости и распределения концентрации хлорофилла *a* на поверхности в Амурском лимане и прилегающих акваториях методом естественных ортогональных функций (ЕОФ);

- оценка общего запаса хлорофилла-*a* в Амурском лимане.

Полученные данные о распределении хлорофилла-*a*, позволяющие выделить зоны повышенного продуцирования, необходимы для расчета первичной продукции и кормовой валентности первого трофического уровня.

### Материал и методика

Материалом для исследования послужили данные о концентрации хлорофилла-*a* в Амурском лимане, полученные станцией TeraScan с искусственного спутника Земли OrbView-2 при помощи сканера SeaWiFS. Станция TeraScan функционирует в СахНИРО с 1997 г. Рассматривали период времени с апреля 2001 г. по май 2004 г.

Концентрацию хлорофилла-*a* рассчитывали по алгоритму OC2 (Ocean..., 1998) с введением в него параметров коррекции на состояние атмосферы.

Все необходимые для реализации заданной схемы метеорологические параметры: давление, ветер, влажность, толщина озонового слоя, температура воды и воздуха – предоставлялись через Интернет соответствующими сайтами NASA.

Для количественного описания сезонных вариаций использовали метод естественных ортогональных функций (Багров, 1959).

В методе естественных ортогональных функций (ЕОФ) изучаемая функция представляется в виде произведения двух функций, одна из которых зависит от координат, а вторая – от времени:

$$T(t, x) = A(t) F(x),$$

где пространственная функция  $F$  раскладывается в ряд по ортогональным составляющим.

При анализе в качестве набора ортогональных пространственных функций используются собственные вектора (моды) ковариационной матрицы. Математическая задача состоит в определении собственных значений этой матрицы и ее собственных векторов – взаимно ортогональных пространственных функций. У каждой такой  $k$ -й функции имеется своя функция  $A_k(t)$ , которая описывает соответствующие изменения во времени и называется амплитудой.

Эти амплитуды одинаковы для всех пространственных точек исследуемого района, а пространственное распределение значений самих векторов характеризует различие сезонного хода изучаемого параметра.

В качестве входных данных рассматривали среднедекадные распределения концентрации хлорофилла-*a* на поверхности океана в районе, ограниченном координатами 141,05–142,00° в. д. и 51,53–53,54° с. ш., на сетке с разрешением около 2 км. Таким образом, исходная матрица состояла из 114 «временных слоев», каждый из них имел размерность 35×115.

### Физико-географическая характеристика района исследований

Амурский лиман расположен к северу от Татарского пролива и соединяет его с Сахалинским заливом. Его южная граница проходит по линии от мыса Южный до мыса Тык, а северная – от мыса Меньшикова до мыса Тамлово. Южная часть Амурского лимана от мыса Погиби до мыса Лах носит название прол. Невельского (Лочия..., 2003).

Большая часть лимана мелководная, она изобилует банками и отмелями, среди которых пролегают узкие и извилистые фарватеры. Глубины в устьевом участке р. Амур больше и изменяются более равномерно.

Колебания уровня воды в лимане в значительной мере зависят от стока р. Амур. В колебании уровня отмечаются два максимума и два минимума. Минимальный сток наблюдается в феврале–марте и в июне. Максимальный – в мае (период весеннего половодья) и в августе–сентябре (период летне-осенних дождей).

Следует отметить, что уровень воды в лимане значительно изменяется также под действием сгонно-нагонных ветров. При северных и северо-восточных ветрах уровень воды на севере лимана может существенно повышаться. Юго-западные, западные и северо-западные ветры вызывают значительный сгон.

В Амурском лимане имеется постоянное течение, обусловленное стоком вод р. Амур. Оно направлено по Южному фарватеру в южную часть лимана, а по фарватерам Невельского и Сахалинскому – на север в Сахалинский залив.

Соленость воды Амурского лимана зависит от стока р. Амур и сезонных ветров. Весной и летом соленость 1 ‰ и менее отмечается вблизи устья р. Амур, в северной части лимана уровень солености составляет 5–10 ‰, в центральной и южной частях лимана возрастает от 5 до 25 ‰. Летом во время отлива соленость понижается, а во время прилива резко повышается. Осенью соленость в центральной и южной частях Амурского лимана от 1 до 2,5 ‰. Несколько возрастает соленость в северной части лимана.

Ледовый период в Амурском лимане характеризуется большой продолжительностью – до 6–7 мес в году. Интенсивному образованию льда способствуют малые глубины и невысокий уровень солености в лимане. Сплошной неподвижный лед появляется в устье р. Амур в середине ноября, а спустя 5–10 дней устанавливается почти на всей акватории Амурского лимана. Взлом неподвижного льда происходит в третьей декаде мая. Лед в лимане тает в основном на месте, и только незначительная его часть выносятся в Сахалинский залив и в Татарский пролив. Окончательное очищение ото льда происходит в конце мая–начале июня.

### Результаты и обсуждение

Результаты расчета собственных значений показали, что первые десять мод характеризуют 83 % общей дисперсии изучаемого параметра, из которых 67 % относится к первой моде (табл. 1). Величины собственных значений существенно уменьшаются при переходе от первой моды ко второй. Следовательно, первая мода является основополагающей, ее временная (рис. 1, А) и пространственная структура (рис. 2, А) отражают наиболее общие свойства вариации концентрации хлорофилла-*a* в Амурском лимане.

Все значения амплитуды первого вектора одного знака – отрицательные. За рассмотренные 3 года наблюдается несколько достаточно устойчивых характеристик сезонной изменчивости содержания хлорофилла-*a*. Как отмечалось выше, с ноября по май Амурский лиман покрыт льдом. Поэтому значения амплитуд в этот период близки к нулю. В апреле начинается процесс «цветения» фитопланктона в северной части Татарского пролива – на границе льдов, стоящих в проливе

Таблица 1

Результаты расчета собственных значений ЕОФ

№ моды	Собственное значение	Доля дисперсии, %	Суммарная дисперсия, %
1	20,636	67,208	67,208
2	1,400	4,560	71,769
3	0,874	2,848	74,617
4	0,565	1,840	76,457
5	0,493	1,607	78,064
6	0,383	1,246	79,310
7	0,327	1,064	80,374
8	0,306	0,997	81,371
9	0,284	0,926	82,297
10	0,271	0,881	83,178

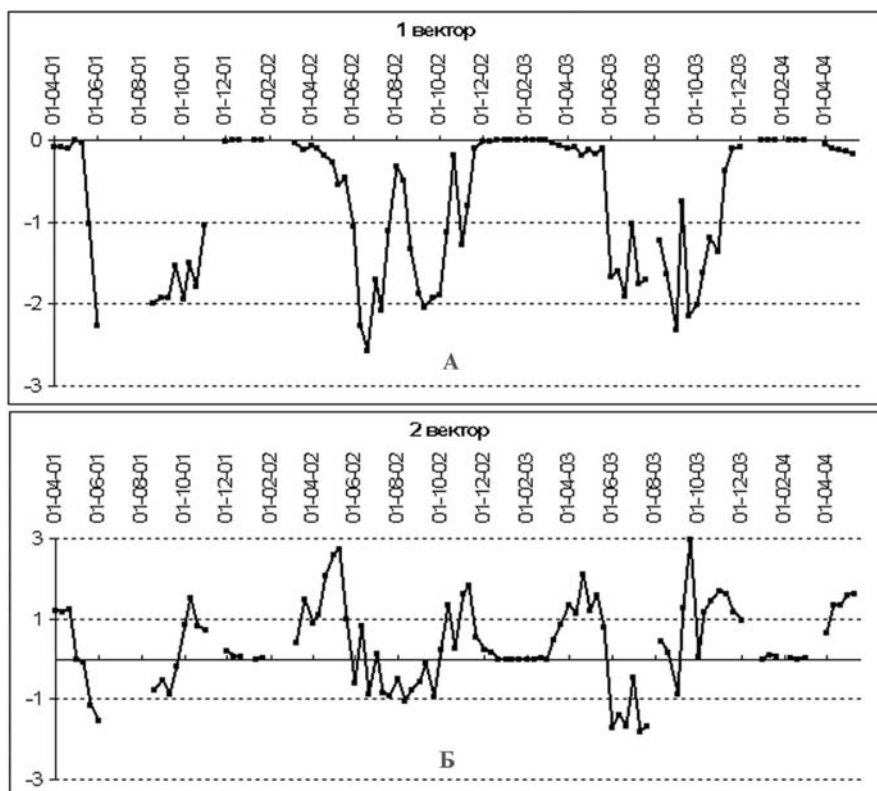


Рис. 1. Изменения во времени амплитуды первой (А) и второй (Б) моды ЕОФ в Амурском лимане за 2001–2003 гг.

Невельского. Это могут быть как хладолюбивые диатомовые, вегетирующие на кромке тающего льда, так и виды, развивающиеся на основе биогенов, выносимых стоком р. Амур по Южному фарватеру (Водоросли..., 1989; Шунтов, 2001). В мае вскрывается ото льда прол. Невельского, и на фоне этого наблюдается повышение концентрации хлорофилла-*a* в проливе, что сразу отражается на величине амплитуды первой моды. Взлом льда в центральной части лимана начинается в конце мая. С этого периода до ноября, происходит процесс активного «цветения» фитопланктона, на развитие которого влияют два благоприятных фактора – вынос биогенов стоком р. Амур и высокая температура воды в Амурском лимане по сравнению с сопредельными акваториями, благоприятная для развития солоноватоводных и пресноводных видов (Константинов, 1979). Хотя на всем промежутке времени с мая по октябрь наблюдается обильное «цветение» микроводорослей, его интенсивность бывает разной, что, видимо, зависит от величины стока р. Амур. Периоды наибольшей продуктивности отмечаются в июне, затем в июле–августе наблюдается некоторый спад, за ним в сентябре следует второй пик усиления фотосинтетической деятельности. Как правило, концентрация хлорофилла-*a* была выше в июне, чем в сентябре, но в 2003 г. наблюдалась противоположная картина, что, возможно, объясняется обильными дождями в сентябре 2003 г. Меньшие концентрации хлорофилла-*a* приходились на периоды паводка р. Амур, которые имеют место в мае и августе–сентябре (Люция..., 2003).

Метод ЕОФ ориентирован на выделение структур, «объясняющих» наибольшую долю общей дисперсии изучаемого параметра. Таким образом, по распределению временной амплитуды следует вывод о том, что первый вектор в основном характеризовал пространственное распределение концентрации хлорофилла-*a* в периоды максимального «цветения» фитопланктона. Значения первого вектора, как и его амплитуда, имели отри-

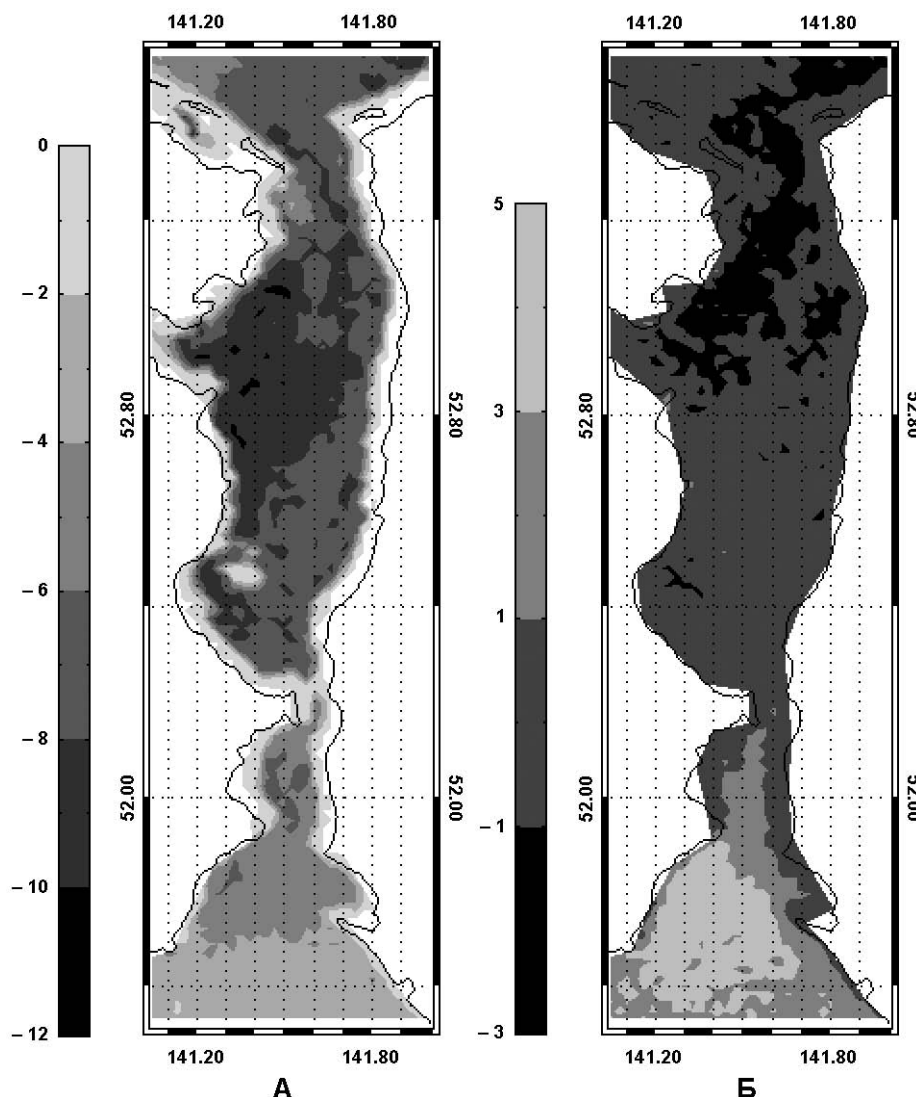


Рис. 2. Пространственное распределение первого (А) и второго (Б) векторов ЕОФ в Амурском лимане за 2001–2003 гг.

цательные величины по всему лиману. В векторе первой моды четко видна структура зависимости распределения концентрации хлорофилла-*a* от речного стока р. Амур. Границы распространения вещества практически совпадают с районами, установленными для фитопланктона И.А. Киселевым (1931). Наибольшие концентрации отмечены в предустьевом участке Амура от мыса Джаоре до мыса Пронге (величина амплитуды от -10 до -8). Это так называемый «речной» район – зона максимального опреснения. На остальной части лимана значения вектора колебались от -8 до -6 (слабоопресненный и сильноопресненный район, по Киселеву). В южной части лимана, включая прол. Невельского, концентрации хлорофилла-*a* снижались – значения вектора варьировали от -6 до -4. В узкой прибрежной мелководной полосе величины первого вектора незначительны (-2–0), что указывает на невысокое содержание пигмента и связано с большой концентрацией взвеси, препятствующей процессу фотосинтеза (Научно-методические подходы..., 1997). Анализируя распределение концентрации хлорофилла-*a* по акватории лимана, отметим направление стока вод, богатых фитопланктоном по Северному фарватеру в восточную часть Сахалинского залива.

Амплитуда второй моды принимает как положительные, так и отрицательные значения (рис. 1, Б). Значения амплитуды весной и осенью были положительными, а летом – отрицательными. При этом распределение значений вектора второй моды четко зонировалось (рис. 2, Б). Отрицательные значения характеризовали сток р. Амур в Сахалинский залив, а зона положительных значений располагалась в прол. Невельского и Татарском проливе. Такое поведение второй моды указывает на то, что процессы развития фитопланктона протекают в противофазе на различных участках лимана. В марте–апреле, когда лиман еще покрыт льдом, идет бурное развитие микроводорослей в прол. Невельского и в северной части Татарского пролива. К июню в прол. Невельского этот процесс почти полностью завершается, зато начинается активная фаза «цветения» фитопланктона в Амурском лимане. В конце сентября–первой половине октября сток Амура опять поворачивает на юг, и в прол. Невельского снова наблюдается усиление фотосинтетической деятельности, продолжающейся вплоть до конца ноября. Таким образом, смена знака во второй моде имеет циклический сезонный характер и определяется направлением стока амурских вод на юг в прол. Невельского и далее в Татарский пролив весной и осенью (Лоция..., 2003). В это время прол. Невельского заполняется пресной водой, а зона смешения пресных и морских вод смещается на юг в Татарский пролив. Это же подтверждается пространственным распределением второй моды (рис. 2, Б).

В амплитуде третьей моды также отмечаются периоды с разными знаками (рис. 3, А). Экстремальные положительные значения наблюдались в конце августа–середине сентября, а отрицательные – в июне–июле. Распределение значений вектора третьей моды выделяет сообщества фитопланктона по отношению к солености (рис. 4, А). Первое, ранее отмеченное сообщество локализовано в пресноводной зоне, и его граница в Амур-

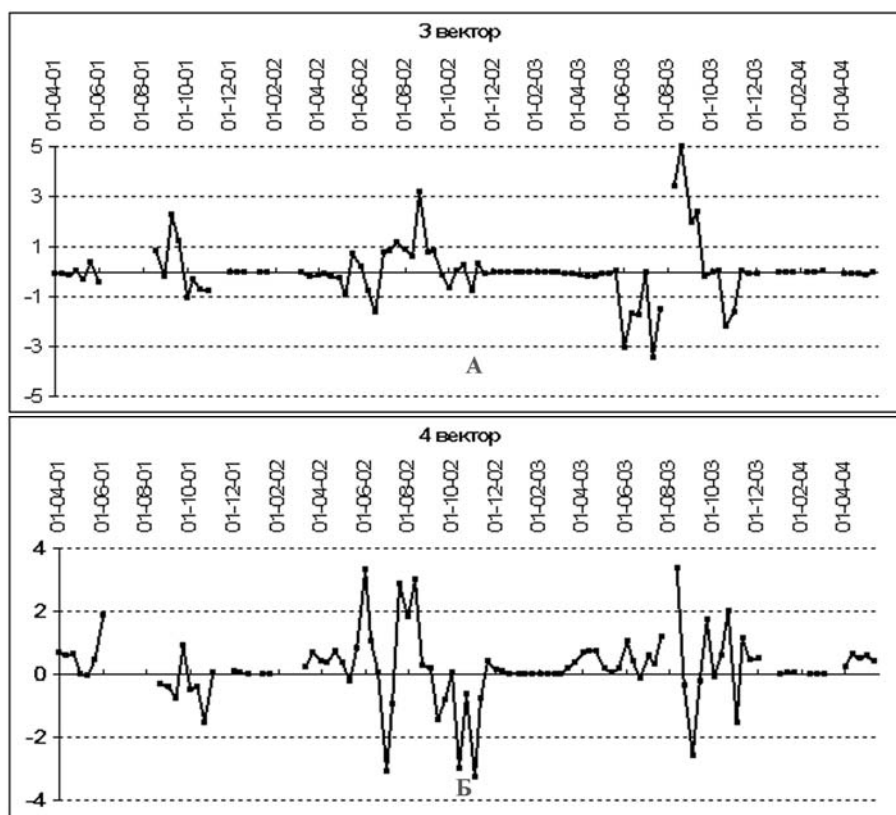


Рис. 3. Изменения во времени амплитуды третьей (А) и четвертой (Б) моды ЕОФ в Амурском лимане за 2001–2003 гг.

ском лимане соответствует  $\alpha$ -хорогалинной зоне – 5–7 ‰ (Хлебович, 1989). Для этого сообщества характерно усиление фотосинтеза в июне–июле (отрицательные значения амплитуды и вектора третьей моды, соответствующее летней межени р. Амур). Следующее сообщество (сильноопресненный район, по Киселеву, 1931) расположено снаружи от пресноводного – от Частых островов и далее по Северному фарватеру до мыса Тамлево. Его внешней границей служат воды с соленостью 15–18 ‰, что является верхним пределом распространения солоноватоводных видов, выделенным Риманом (цит. по: Хлебович, 1989). Далее располагается сообщество морских эвригалинных видов, южной границей которого является прол. Невельского на траверсе мыса Лазарева. На север оно распространяется вдоль сахалинского берега до устья р. Лангры. Аналогичное сообщество наблюдается в южной части Сахалинского залива. Именно здесь интенсифицируется процесс фотосинтеза в конце августа–начале сентября (положительные экстремумы амплитуды и вектора третьей моды, совпадающие с летним паводком р. Амур). Сообщество ограничено водами с соленостью 22–26 ‰ ( $\beta$ -хорогалинная зона (Хлебович, 1989)). Видимо, данная мода определяется смешением границы пресных и морских вод в

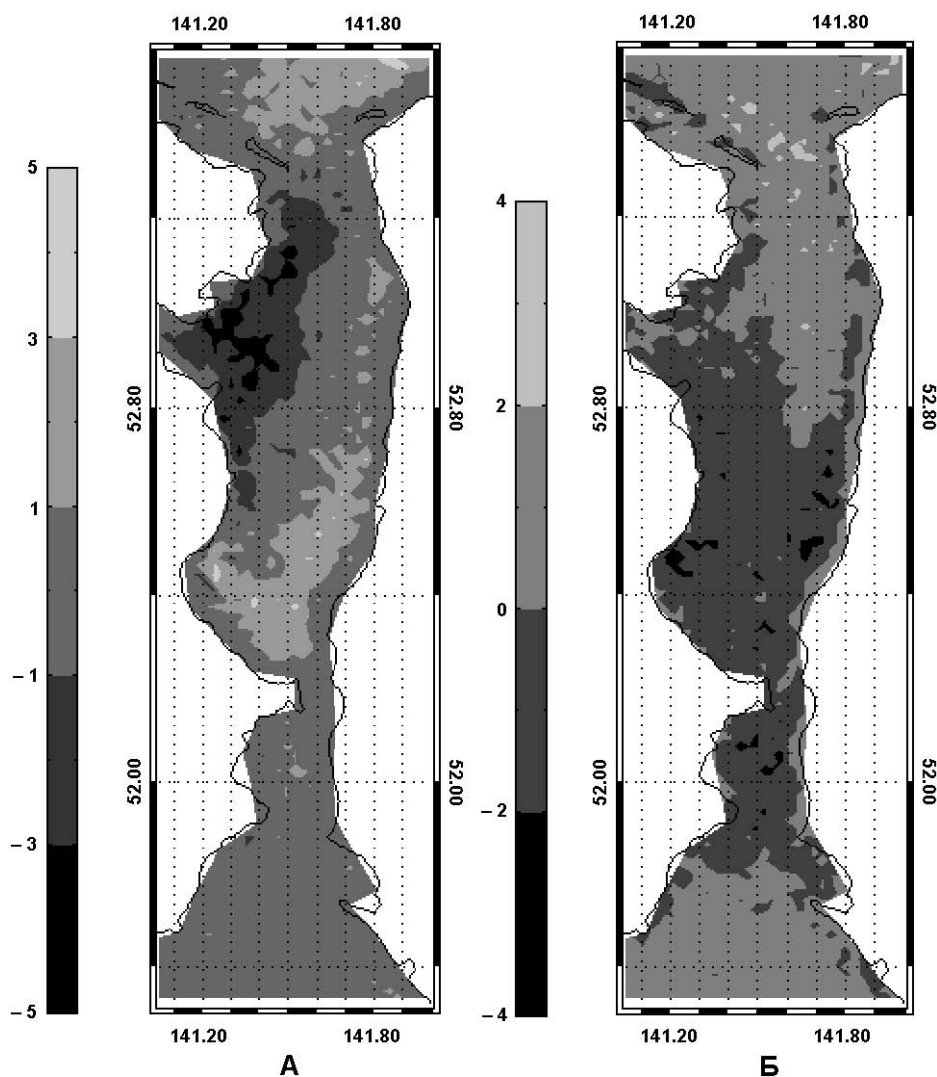


Рис. 4. Пространственное распределение третьего (А) и четвертого (Б) векторов ЕОФ в Амурском лимане за 2001–2003 гг.

зависимости от уровня режима р. Амур. Отмечено увеличение размаха амплитуды от 2001 к 2003 г., что, возможно, соответствует межгодовому увеличению паводков.

Амплитуда четвертой моды не имеет ярко выраженной закономерности (рис. 3, Б). Причины, обуславливающие такую изменчивость, становятся понятны при рассмотрении распределения вектора четвертой моды и имеют климатический характер (рис. 4, Б). На рисунке хорошо видно перераспределение распресненных зон в центральную и южную части Амурского лимана и прол. Невельского во время значительных ветров южного направления вследствие прохождения глубоких циклонов в северной части Охотского моря (Любичкий, Шведов, 1994). Эти ветра препятствуют проникновению пресных вод в Сахалинский залив и в северную часть Амурского лимана. Граница между распресненными и морскими водами и соответствующими им сообществами фитопланктона проходит от мыса Пуир до мыса Ихдам. Остальные моды имеют низкий вклад в общую дисперсию (менее 2 %) и вносят незначительные частные поправки, касающиеся особенностей распределения хлорофилла-а на узкоограниченных участках акватории Амурского лимана.

**Оценка общего содержания хлорофилла-а в Амурском лимане.** В табл. 2 представлены рассчитанные среднемесячные значения концентрации хлорофилла-а с апреля по октябрь.

Т а б л и ц а 2

Оценка общего содержания хлорофилла-а в Амурском лимане

Период	Среднее, мг/м <sup>3</sup>				Общее содержание, т			
	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.
Апрель	6,68	8,43	7,89	4,86	100	126	118	73
Май	11,79	11,44	6,37	10,83	177	172	96	162
Июнь	14,83	15,42	11,59	-	223	231	174	-
Июль	-	13,12	10,81	-	-	197	162	-
Август	13,10	12,98	13,22	-	197	195	198	-
Сентябрь	13,00	13,72	15,37	-	195	206	231	-
Октябрь	12,81	12,94	13,94	-	192	194	209	-
Ноябрь	9,46	10,17	11,62	-	142	153	174	-
Среднее за год	11,67	12,28	11,35	-	175	184	170	-

Вариации средних в основном соответствуют изменчивости амплитуды первой моды. Минимальные средние значения отмечены весной (в апреле – от 5 до 8 мг/м<sup>3</sup>). Максимальный пик приходился на июнь – до 15 мг/м<sup>3</sup>. В целом средние значения летом и осенью варьируют незначительно – от 10 до 15 мг/м<sup>3</sup>. Показатели в июле–августе чуть ниже, чем в июне. Осенью наблюдается некоторое усиление фотосинтетической деятельности. В сентябре–октябре 2003 г. значения средних концентраций хлорофилла-а были даже выше, чем в июне.

По приведенным выше средним значениям концентрации хлорофилла-а можно провести оценку (хотя и достаточно грубую) общей биомассы вещества в Амурском лимане, учитывая при этом общую площадь водоема в 5000 км<sup>2</sup> и его среднюю глубину в 3 м. Полученные оценки представлены в табл. 2. Общая биомасса хлорофилла-а изменяется от 70 до 230 т.

### Заключение

При анализе спутниковых данных о концентрации хлорофилла-а с помощью метода ЕОФ выделены следующие факторы, влияющие на распределение данного вещества, а следовательно и фитопланктона в целом, на акватории Амурского лимана:



- вынос биогенов р. Амур (определяет повышенные концентрации пигмента);
  - направление стока р. Амур (в Татарский пролив или Сахалинский залив);
  - распределение солёности (обуславливает существование толерантных к различным диапазонам солёности сообществ фитопланктона, различающихся по концентрациям и динамике образования пигмента);
  - глубокие циклоны с ветрами южного направления (влекнут за собой изменение границы распресненных и морских вод, тем самым изменяя локализацию сообществ фитопланктона вод различной солёности).
- Определены некоторые закономерности временной изменчивости:
- максимум «цветения» приходится на тёплый период года;
  - наблюдаются два пика «цветения» – в июне и сентябре;
  - меньшие концентрации хлорофилла-*a* наблюдаются во время паводка р. Амур, которые имеют место в мае и августе–сентябре;
  - отмечаются незначительные межгодовые колебания концентрации вещества в воде (среднегодовое содержание пигмента с 2001 до 2003 г. варьирует от 11,35 до 12,28 мг/м<sup>3</sup>).

### Литература

- Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Тр. ЦИП. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
- Вентцель М.В., Крылов В.В., Левашиова С.С. Закономерности распределения фитопланктона по акватории Северо-Западной Пацифики // Мор. гидробиол. исслед.: сб. науч. тр. М.: ВНИРО, 2000. С. 11–21.
- Водоросли: справочник / под ред. С.П. Вассера. Киев: Наук. думка, 1989. 608 с.
- Киселев И.А. Состав и распределение фитопланктона в Амурском лимане // Исслед. морей СССР. Л.: ГГИ, 1931. Т. 14. С. 31–116.
- Константинов А.С. Общая гидробиология. М.: Высш. школа, 1979. 480 с.
- Лоция Татарского пролива, Амурского лимана и пролива Лаперуза. СПб.: Гл. упр. навигации и океанографии МО РФ, 2003. 436 с.
- Любичкий Ю.В., Шведов А.Е. Штормовые нагоны на устьевом взморье Амура // Вод. ресурсы. 1994. Т. 6, № 6. С. 609–614.
- Научно-методические подходы к оценке воздействия газонефтедобычи на экосистемы морей Арктики (на примере Штокмановского проекта). Апатиты, 1997. 393 с.
- Хлебович В.В. Критическая солёность и хорогалиникум: современный анализ понятий // Биология солоноватых и гипергалинных вод: тр. ЗИН АН СССР. 1989. Т. 196. С. 5–10.
- Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России. Владивосток: ТИНРО, 2001. 580 с.
- Distribution of phytoplankton in the coastal waters of Sakhalin Island (Sea of Okhotsk) in summer 2001 / Selina M.S., Morozova T.V., Stonik I.V., Orlova T.Yu. // PICES Scientific Report. 2004. N 26. P. 193–194.
- Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS / Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G. et al. // J. of geophysical research. 1998. V. 103, N C11. P. 24,937–24,953.
- Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P. The accuracy of chlorophyll *a* concentration estimates of SEAWIFS satellite color scanner from the data for the Sea of Okhotsk in the spring-summer time // PICES Scientific Report. 2004. N 26. P. 143–150.